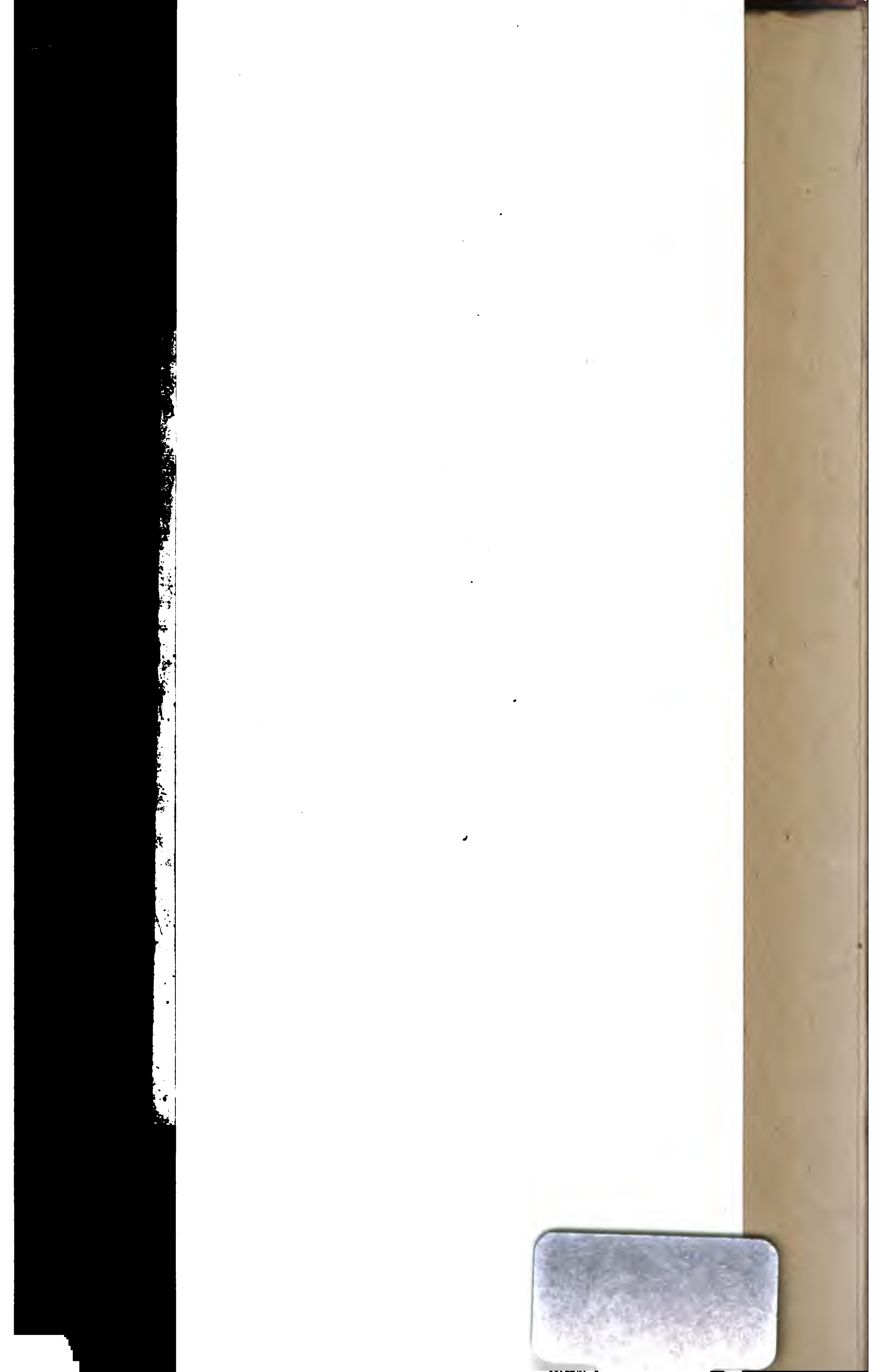


Der

elektrische Strom

und seine

wichtigsten Anwendungen

in gemeinverständlicher Darstellung

von

Willibald

Dr. W. Bermbach,

Oberlehrer am Kgl. Gymnasium in Münstereifel.

Zweite, gänzlich umgearbeitete und vermehrte Auflage.

Mit 135 Abbildungen.

Leipzig

Verlag von Otto Wigand.

1899.

Vorwort
zur zweiten Auflage.

Vergleicht man die vorliegende Auflage mit der ersten, so findet man, dass ein neues Buch entstanden ist. Der in der ersten Auflage behandelte Stoff ist grösstenteils vervollständigt oder neu bearbeitet worden; ausserdem ist eine grosse Reihe von neuen Abschnitten zu den alten hinzugekommen.

Zunächst ist hervorzuheben, dass, soweit es sich mit dem Zwecke dieses Buches vereinbaren liess, die Kraftlinientheorie eingeführt ist, die, wenn man sich mit ihr vertraut gemacht hat, bei der Magnetoinduktion, den Dynamomaschinen und der Voltainduktion das Verständnis der Vorgänge und Erscheinungen wesentlich erleichtert.

Das Potential wurde im Haupttexte absichtlich nicht ausführlich behandelt; dafür findet man im Anhange eine Abhandlung über diesen wichtigen Begriff. Daselbst wird auch der Unterschied zwischen Spannung und Potential einerseits, elektromotorischer Kraft und Klemmspannung anderseits hervorgehoben. Diejenigen Leser, die einige Kenntnisse in der Physik besitzen, mögen den Anhang, in dem auch das absolute Masssystem zusammenhängend dargestellt ist, nach dem achten Abschnitte durchstudieren.

Der Inhalt wurde ferner bereichert durch die Abschnitte über den Spannungsverlust, die Wheatstone'sche Brücke, die

Theorie der Elektrolyse von Clausius, das Faraday'sche Gesetz, die Gleichstromelektromotoren, die Wechselströme und Drehströme, die Glühkörper von Nernst und Auer, die X-Strahlen, die Versuche von Hertz und Tesla und die Funkentelegraphie.

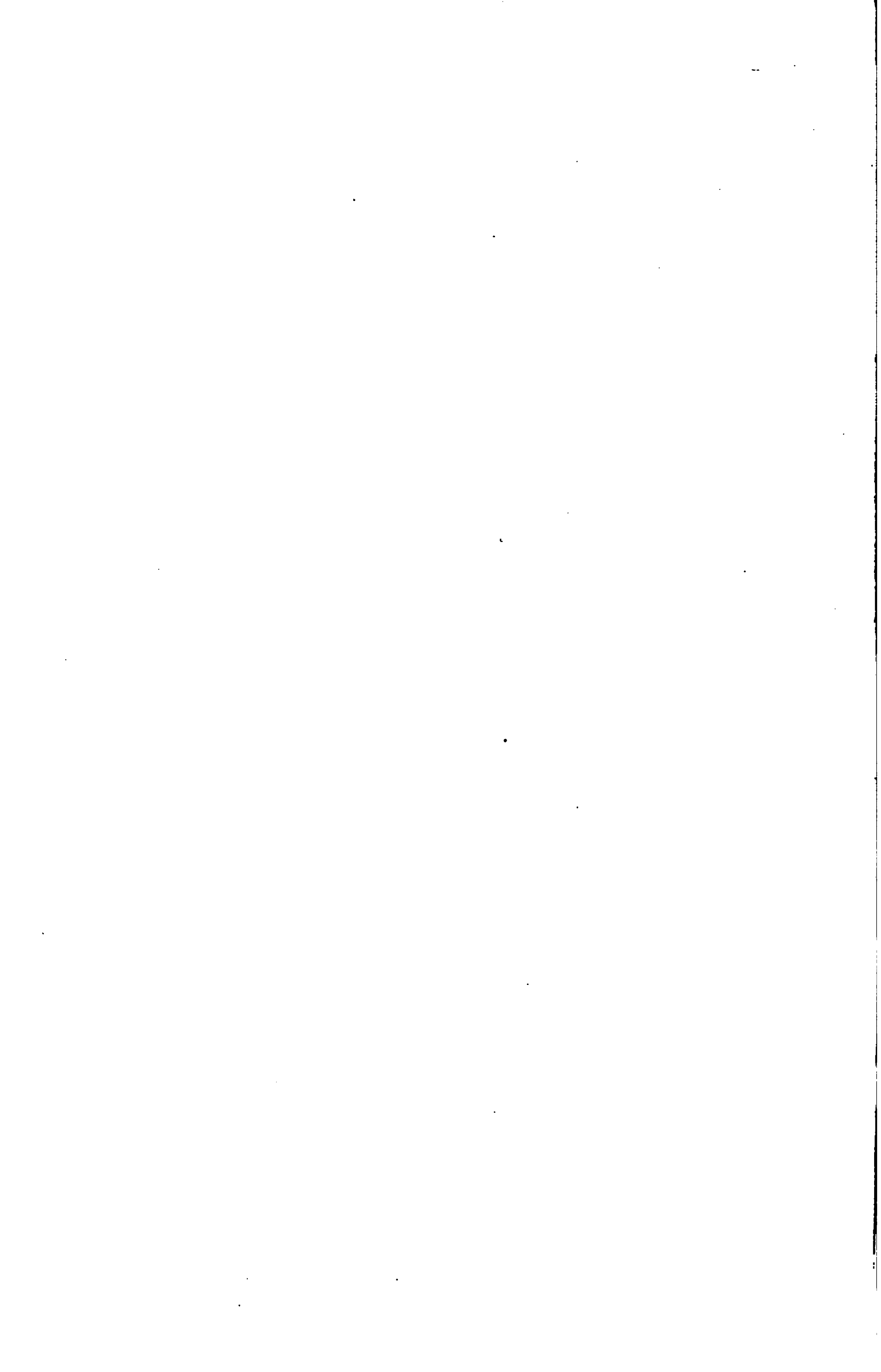
Wo sich Gelegenheit bot, sind die wichtigsten Fragen der Elektrotechnik berührt worden.

Meinem Kollegen Schwertführer spreche ich für seine Beihülfe bei der Korrektur meinen verbindlichsten Dank aus.

Münstereifel, im November 1898.

Der Verfasser.

Inhalt.



Erstes Kapitel.

Vorbereitender Teil.

Das Verständnis der nachfolgenden Erörterungen bei den der wissenschaftlichen Sprache Unkundigen zu sichern, ist es vor allem notwendig, einige Ausdrücke, die in ihnen beständig wiederkehren werden, zur klaren Erkenntnis zu bringen.

1. Mechanische Arbeit, Effekt (Pferdekraft).

Hebt ein Arbeiter eine Last von 20 kg 10 m hoch, so leistet er eine gewisse Arbeit; er wendet eine gewisse Kraft an, und zwar auf einem Wege von 10 m. Hebt ein anderer Arbeiter eine Last von 40 kg 10 m hoch, so ist die von ihm geleistete Arbeit offenbar doppelt so gross wie die von dem ersteren Arbeiter verrichtete, weil bei gleichem Wege die Last zweimal so gross ist wie im ersten Falle, also auch der Kraftaufwand. Wenn endlich ein dritter Arbeiter eine Last von 20 kg 30 m hoch hebt, so leistet derselbe eine dreimal so grosse Arbeit wie der erste, weil bei derselben Last der Weg dreimal so gross ist. In allen drei Fällen nennen wir die verrichtete Arbeit eine mechanische. Denn so nennen wir jede Arbeit, die wir vermöge der Kraft unserer Muskeln als natürlicher Maschinen verrichten oder uns verrichtet denken können.

Aus den angeführten Beispielen ergiebt sich, dass die Grösse der mechanischen Arbeit von zwei Faktoren abhängig ist, nämlich der Grösse der Last und der Länge des Weges. Wir messen nun die mechanische Arbeit durch Meterkilogramme

und verstehen unter einem Meterkilogramm die Arbeit, die geleistet wird, wenn eine Last von 1 kg um 1 m gehoben wird.

In unserem ersten Beispiele ist die Arbeit gleich 20 . 10 mkg = 200 mkg (Meterkilogramm); denn heben wir eine Last von 20 kg 1 m hoch, so beträgt die Arbeit 20 mkg; heben wir also 20 kg 10 m hoch, so ist die Arbeit zehnmal so gross.

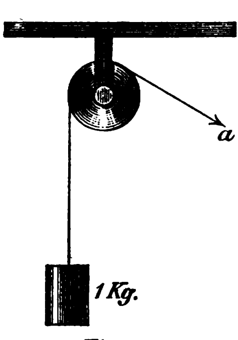


Fig. 1.

Ziehen wir vermittelst einer Rolle eine Last von 1 kg (Fig. 1) vertikal aufwärts, so müssen wir fortwährend die ganze Schwerkraft, d. h. die Kraft, die jeden Körper nach dem Mittelpunkte der Erde hin oder, wie wir im gewöhnlichen Leben sagen, nach unten zieht, überwinden. Die Schwerkraft wird aber gemessen durch das Gewicht. Man muss also an dem Seilende *a* mit einer Kraft ziehen, die gleich 1 kg ist. (Von der Reibung sehen wir einstweilen ab.)

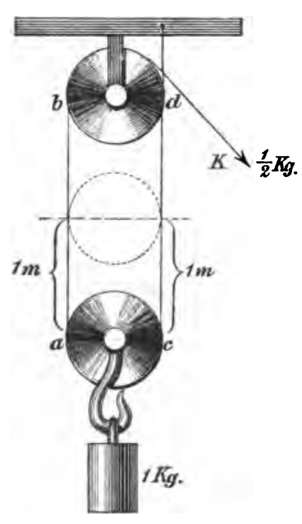


Fig. 2.

Bei einem Flaschenzug mit zwei Rollen und zwei Seilstücken (Fig. 2) genügt eine Kraft von $^1/_2$ kg zur Hebung der Last. (Das Gewicht der unteren Rolle vernachlässigen wir.) Wollen wir aber die Last 1 m hoch heben, so müssen wir sowohl *a b* als auch *c d* um 1 m verkürzen, also 2 m Seil abwickeln. Multipliziert man den Weg von 2 m, den das Kraftgewicht oder die Kraft durchlaufen muss, um die Last 1 m hoch zu heben, mit der aufgewendeten Kraft selbst — $^1/_2$ kg —, so erhalten wir 1 mkg.

Wir dürfen daher sagen: Man erhält die geleistete Arbeit in mkg, wenn man die Kraft (nicht Last), ausgedrückt in kg,

multipliziert mit dem Wege, auf dem die Kraft wirkt, gemessen in Metern.

Wenn man sich von der Leistung einer Maschine eine Vorstellung machen will, so bestimmt man die Arbeit, die von der Maschine in der Zeiteinheit verrichtet wird. Als Zeiteinheit wählt man gewöhnlich die Sekunde. Man nennt nun die in 1 Sekunde geleistete Arbeit den Effekt der Kraft. Ein Effekt von 75 mkg wird Pferdekraft (PS oder HP) genannt. Eine einpferdige Maschine z. B. kann in jeder Sekunde 75 kg 1 m hoch heben oder eine entsprechende Arbeit verrichten.

Will man also die während einer gewissen Zeit von einer Maschine geleistete Arbeit bestimmen, so muss man den Effekt mit der Sekundenanzahl multiplizieren. Eine Arbeit von 3600.75 mkg nennen die Techniker Pferdekraftstunde (1 Stunde = 3600 Sekunden).

2. Energie (Spannkraft).

Hat man 1 kg 1 m hoch gehoben, so hat man eine Arbeit von 1 mkg geleistet. Stellen wir nun das emporgehobene kg auf eine Unterlage (Fig. 3), so repräsentiert es einen gewissen Arbeitsvorrat, es ist zu einer gewissen Arbeit fähig, über die man jederzeit verfügen kann. Befestigen wir z. B. an *a* das eine Ende eines Fadens, der über eine Rolle geschlungen ist, das andere Ende des Fadens aber an eine Last *b*, die ein wenig leichter ist als 1 kg, und nehmen wir dann die Unterlage weg, so sinkt *a* und hebt für uns die Last 1 m hoch, leistet also für uns eine Arbeit. Das kg *a* hat also, so lange es auf der Unterlage ruht, die Fähigkeit, Arbeit zu leisten. Die Fähigkeit, Arbeit zu verrichten, nennen wir

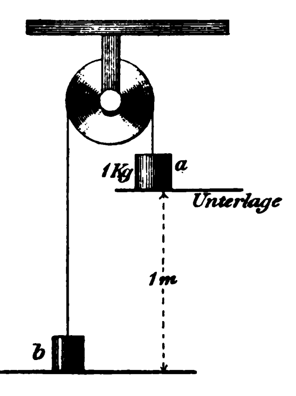


Fig. 3.

„Energie". Jeder Körper, der sich über der Erdoberfläche befindet, hat demnach Energie. Statt des Wortes Energie braucht man auch vielfach den Ausdruck „Spannkraft", weil eine gespannte Feder ebenfalls die Fähigkeit hat, Arbeit zu leisten. Als Mass der Energie dient die Arbeit, die von einem Körper, dem Energie innewohnt, geleistet werden kann. Ein Gewicht von 10 kg z. B., das sich 5 m hoch über dem Erdboden befindet, hat eine Energie, die gleich 50 mkg ist.

Wir sagten eben, die Last *b* (Fig. 3) müsse etwas leichter sein als 1 kg. Warum dies? Wenn *a* sinkt und *b* steigt, so findet Reibung statt zwischen dem Faden und der Rolle, ferner zwischen der Rolle und ihrer Achse, endlich zwischen den bewegten Teilen und der Luft. Die Reibung ist aber ein Bewegungshindernis. Also sind bei unserem einfachen Mechanismus Bewegungshindernisse zu überwinden. Wären diese nicht vorhanden, so könnte *a* eine Last von 1 kg 1 m hoch heben. Bei jeder Reibung aber entwickelt sich Wärme. Also entsteht auch bei der Bewegung von *a* und *b* Wärme. Es wird demnach ein Teil des in *a* aufgespeicherten Arbeitsvorrates in Wärme umgewandelt.

Reibt man zwei Eisenstücke gegen einander, so verrichtet man eine mechanische Arbeit. Wie nun die Erfahrung lehrt, erwärmen sich die geriebenen Eisenstücke. Auch dieses Beispiel lehrt uns, dass mechanische Arbeit in Wärme übergeführt werden kann.

Nun liegt die Frage nahe: kann man umgekehrt auch Wärme in mechanische Arbeit umsetzen? Dass diese Frage zu bejahen ist, zeigt die Dampfmaschine. Wir wollen jedoch an zwei einfache Vorgänge anknüpfen. 1) Auf einem Eisenblock liege eine Last von 100 kg (Fig. 4). Wird nun das Eisen erwärmt, so dehnt es sich mit grosser Kraft aus und hebt die Last in die Höhe. Beträgt die Verlängerung jeder vertikalen Kante *a b*, *c d* etc. infolge der Erwärmung 1 mm, so wird die Last um 1 mm gehoben. Die von der Wärme in diesem Falle geleistete

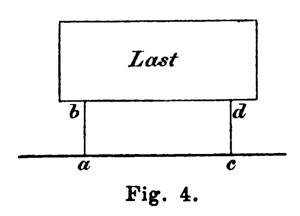


Fig. 4.

sichtbare, äussere Arbeit ist gleich 100.0,001 mkg = 0,1 mkg. (Der Weg ist in Metern zu messen; 1 mm = 0,001 m.) 2) Verschliesst man einen mit Luft gefüllten Cylinder (Fig. 5) durch einen dicht schliessenden Kolben und erwärmt dann die Luft in dem Cylinder, so wird der Kolben nebst einem entsprechenden Gewichte gehoben.

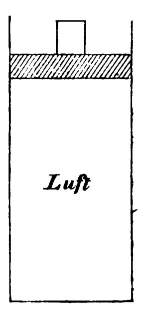


Fig. 5.

Nach dem Mitgeteilten wird es verständlich sein, wenn wir sagen: eine gewisse Wärmemenge entspricht einer bestimmten mechanischen Arbeit und umgekehrt. Ferner wird man einsehen, dass es gerechtfertigt ist, wenn wir die Wärme eine Energieform nennen.

Diejenige Wärmemenge, die man 1 kg Wasser zuführen muss, wenn man seine Temperatur um 1° C. erhöhen will, nennt man Wärmeeinheit oder Kalorie. Nun hat man durch Versuche gefunden, dass eine Kalorie gleichwertig (äquivalent) einer Arbeit von 424 mkg ist. Will man also durch mechanische Arbeit eine Kalorie erzeugen, so muss man eine Arbeit von 424 mkg verrichten; wird umgekehrt eine Kalorie in mechanische Arbeit umgesetzt, so erhält man 424 mkg.

Es ist allgemein bekannt, dass eine mit Wollen- oder Seidenzeug geriebene Siegellackstange, ein geriebener Glasstab etc. elektrisch sind, was man unter anderem daran erkennt, dass sie leichte Körperchen, wie Papierschnitzel oder dergl. anziehen. Nähert man einer elektrisierten Siegellackstange eine kleine Holundermarkkugel, so wird dieselbe angezogen, etwas in die Höhe gehoben. Das Heben des Kügelchens ist eine mechanische Arbeit. Also hat ein elektrischer Körper die Fähigkeit, Arbeit zu verrichten; er verhält sich ungefähr so wie ein emporgehobenes Gewicht. Daher dürfen wir auch von „elektrischer Spannkraft“ oder „elektrischer Energie“ sprechen und die Elektricität eine „Energieform“ nennen.

Was bezüglich der Energie von der Elektricität gesagt wurde, gilt auch vom Magnetismus, da ja der Magnet die Eigenschaft hat, Eisen anzuziehen oder zu heben.

3. Die wichtigsten chemischen Grundbegriffe.

Element nennen wir in der Chemie einen Stoff, der auf keine Weise mehr mit den der Wissenschaft zu Gebote stehenden Mitteln in verschiedene einfachere Bestandteile zerlegt werden kann. So ist z. B. die reine Kohle ein Element, ferner sind alle Metalle in geläutertem Zustande Elemente. Das Wasser dagegen ist kein Element; denn wir können es in zwei wesentlich verschiedene Gase, nämlich in Sauerstoff (Oxygenium, O) und Wasserstoff (Hydrogenium, H) zerlegen, einfache Stoffe, die weiter zu zerlegen nach dem derzeitigen Stande der Wissenschaft nicht möglich ist. Wir nennen das Wasser deshalb eine chemische Verbindung. Die Chemie lehrt uns nun, aus Elementen chemische Verbindungen herzustellen, chemische Verbindungen in Elemente zu zerlegen und aus chemischen Verbindungen andere chemische Verbindungen herzustellen.

Molekül und Atom. Unter Molekülen oder Molekeln des Wassers versteht man die kleinsten Wasserteilchen, die noch für sich bestehen können, ohne die Eigenschaft zu verlieren, Wasser zu sein. Was vom Wasser gilt, gilt in derselben Weise von anderen Stoffen. Wir werden nun später erfahren, dass wir das Wasser durch den elektrischen Strom in zwei verschiedene Gase, in Wasserstoff (H) und Sauerstoff (O), zerlegen können. Daher müssen die Wassermoleküle aus kleinsten Teilchen Wasserstoff und Sauerstoff, aus sogenannten Atomen, bestehen. Die Moleküle sind auf chemischem Wege noch einer Teilung fähig, während die Atome auf keine Weise mehr zerlegt werden können. Bei der Zersetzung des Wassers erhält man nun doppelt so viele Kubikcentimeter H wie O. Dies erklären wir am einfachsten durch die Annahme, dass ein Molekel Wasser aus zwei Atomen H und einem Atom O besteht und bringen diesen Gedanken kurz dadurch zum Ausdruck, dass wir für Wasser die chemische Formel H_2O gebrauchen. Ein Molekül Schwefelsäure besteht aus 2 Atomen H, 1 Atom Schwefel (S = sulfur) und 4 Atomen O. Daher lautet die chemische Formel für die Schwefelsäure: H_2SO_4.

Wirft man in Chlorwasserstoff oder Salzsäure (HCl, Cl = Chlor) kleine Natriumstücke, so wirkt das Natrium (Na) auf die Salzsäure ein; es verdrängt gleichsam den Wasserstoff, der frei wird, und tritt an dessen Stelle. Dieses Aufeinanderwirken der Stoffe drücken wir durch die chemische Umsetzungsgleichung

HCl + Na = NaCl + H (NaCl = Kochsalz, Chlornatrium)

aus.

Wenn zwei oder mehr Elemente sich zu einer Verbindung vereinigen, so geschieht dies unter Entwickelung von Wärme: die in den verschiedenen Elementen latente Wärme wird frei. Bei der Verbrennung der Kohle z. B. verbindet sich die Kohle (C) mit dem Sauerstoff der atmosphärischen Luft (100 l Luft enthalten ca. 79 l Stickstoff und 21 l Sauerstoff) zu Kohlensäure (CO_2); bei diesem Prozesse wird, wie jedermann weiss, Wärme erzeugt oder frei. Wollen wir dagegen eine chemische Verbindung AB, die aus den Elementen A und B besteht, in diese ihre Bestandteile zerlegen, so müssen wir AB Wärme zuführen — etwa durch das Unterhalten einer Flamme —, d. h. es wird Wärme verbraucht. (Siehe auch den folgenden §.) Konnten wir nun die Wärme eine Energieform nennen, so dürfen wir jetzt, da bei chemischen Prozessen (Verbindungen der Elemente und Zerlegung einer Verbindung in Elemente), wie wir gesehen, Wärme erzeugt oder verbraucht wird, von „chemischer Energie“ oder „chemischer Spannkraft“ sprechen.

Ein äusserst wichtiger Satz über die verschiedenen Energieformen nun lautet: „Entsteht eine Energieform, z. B. Elektricität, so können wir schliessen, dass eine andere Energieform vorher vorhanden war, und dass diese letztere zum Teil oder ganz in die neue Energieform (Elektricität) umgewandelt worden ist“. Wenn also Elektricität entsteht, so ist diese entweder auf Kosten mechanischer Arbeit oder aus Wärme oder aus chemischer Energie entstanden.

Den genannten Satz nennt man

4. Das Prinzip von der Erhaltung der Kraft.

Das Gesetz von der Erhaltung der Kraft oder, wie man jetzt sagt, von der Erhaltung der Energie, das die Grundlage der ganzen neueren Physik bildet, ist zuerst von J. R. Mayer im Jahre 1842 in Batavia veröffentlicht worden und 1847 von Hermann v. Helmholtz, dem Mayer's Abhandlung wahrscheinlich unbekannt geblieben war, mathematisch formuliert und begründet worden. Wir wollen das genannte Gesetz an einem besonderen Falle zu erläutern suchen.

Die Sonne, die Quelle alles Lebens und aller Bewegung, strahlt fortwährend Wärme in das Weltall aus. Ein kleiner Bruchteil dieser Wärme gelangt auf unsern Weltkörper. Die Pflanzen nehmen, so lange sie wachsen, so lange Leben in ihnen ist, von dieser Wärme soviel auf, als sie zu ihrer Entwickelung bedürfen. Unter gewissen Bedingungen entwickelt sich unter weiterer Wärmeaufnahme aus der Pflanze die Kohle. Man kann also die Kohle als ein Wärmemagazin ansehen; die in derselben aufgespeicherte Wärme ist mit dem Thermometer nicht nachweisbar, da sie bei der Entwickelung der Pflanze und der Bildung der Kohle für chemische Prozesse verbraucht worden ist. Diese Wärme ist gerade so wenig mit dem Thermometer nachweisbar, wie die Wärme, die man Eis von 0^0 zuführen muss, um es in Wasser von 0^0 zu verwandeln. Wenn sich aber die Kohle bei der Verbrennung mit dem Sauerstoff der Luft verbindet, so werden die Prozesse, die eben erwähnt wurden, zum Teil rückgängig gemacht, und infolge dessen wird die aufgespeicherte Wärme frei. Berücksichtigt man noch, dass die lebende Pflanze Kohlensäure in sich aufnimmt, Sauerstoff aber ausatmet, und dass bei der Verbrennung der Kohle Sauerstoff verbraucht, Kohlensäure aber erzeugt wird, so sieht man, dass wir es mit einem vollständigen Kreislaufe zu thun haben, bei dem weder Stoff noch Wärme verloren geht.

Benutzen wir Kohle als Feuerungsmaterial bei einer Dampfmaschine, so wird ein grosser Teil der Verbrennungswärme an die Umgebung des Ofens abgegeben, dem Weltall also zurückerstattet; ferner wird Wärme verbraucht, um das

Wasser im Kessel bis zur Siedetemperatur zu erwärmen, und vor allem, wenn sich aus Wasser Dampf bildet. Durch die zugeführte Wärme erlangt der Dampf seine Spannkraft, und diese befähigt ihn, den Kolben der Maschine zu bewegen. Die Bewegung des Kolbens aber ist eine mechanische Arbeit; es wird also Wärme in mechanische Arbeit umgesetzt.

Wird durch die Dampfmaschine eine elektrische Maschine, d. h. eine Maschine, in der ein elektrischer Strom erzeugt wird (Dynamomaschine), getrieben, so sind innerhalb der beiden Maschinen Reibungswiderstände zu überwinden. Bei der Reibung entwickelt sich Wärme, welche an die Umgebung abgegeben wird. Entsteht nun in der Dynamomaschine ein elektrischer Strom, so wird in dieser mechanische Energie in elektrische Energie umgewandelt.

Lassen wir endlich den elektrischen Strom durch einen dünnen Draht fliessen, so wird dieser erhitzt, also Wärme erzeugt. Bei all den genannten Prozessen nun, lehrt uns das Gesetz von der Erhaltung der Energie, geht keine Wärme verloren, d. h. wenn man die Posten der frei gewordenen Wärme addiert, so erhält man gerade so viel Wärme, wie in der Kohle aufgespeichert war.

Den Satz von der Erhaltung der Energie können wir also kurz so formulieren: „Die Energie des Weltalls ist der Grösse nach unveränderlich; es ist wohl möglich, die eine Energieform in die andere umzusetzen, aber niemals geht Energie verloren“.

5. Die Grundbegriffe des Magnetismus.

Da bei den elektrischen Apparaten und Maschinen die Magnete eine grosse Rolle spielen, so müssen wir einige Bemerkungen über den Magnetismus vorausschicken.

Legt man einen Kompass auf den Tisch, so bewegt sich die Magnetnadel desselben einige Male hin und her, sie schwingt, und nimmt dann eine bestimmte Ruhelage ein. Die eine Spitze der Nadel zeigt ungefähr nach Norden, die andere also ungefähr nach Süden. Man nennt nun die Spitzen

einer Magnetnadel oder die Endflächen eines Magnetstabes „Pole“. Da nun, wie man sich beim Kompass leicht überzeugen kann, stets ein und dasselbe Ende der Nadel nach der nördlichen, das andere nach der südlichen Richtung hinweist, so sind die beiden Pole wesentlich verschieden. Denn wären sie nicht verschieden, so müsste bald die eine, bald die andere Spitze nach Norden zeigen. Dinge aber, die wesentlich verschieden sind, belegen wir mit verschiedenen Namen. Wir nennen den einen Pol „Nordpol“ (*N*), den andern „Südpol“ (*S*).

Biegt man einen Magnetstab in der Weise um, wie es die Fig. 6 andeutet, so nennt man ihn „Hufeisenmagnet“. In dieser Gestalt bringt man die Magnete gern zur Verwendung, weil man dann die magnetische Kraft besser ausnutzen, nämlich beide Pole zugleich beschäftigen kann.

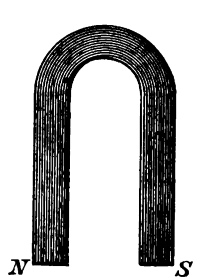


Fig. 6.

Eisen, besonders weiches Eisen, das sich in der Nähe eines Magnetpols befindet, wird selbst magnetisch. Wem ein einigermassen starker Magnet zur Verfügung steht, kann sich hiervon leicht durch einen Versuch überzeugen: Schiebt man unter den einen Pol eines Magnets ein Stück Pappdeckel (Fig. 7), und nähert man dann ein Stück weiches Eisen der unteren Seite des Pappdeckels, so bleibt das Eisenstück, falls es nicht zu schwer ist, hängen; dass *a b* jetzt magnetisch ist, beweist der Umstand, dass ein zweites Stück Eisen, etwa eine Stricknadel oder ein Nagel, von dem Pole *as* angezogen wird.

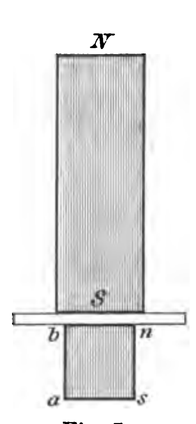


Fig. 7.

Da die Erde selbst ein grosser Magnet ist, so folgt, dass alles Eisen, (wenn auch nur schwach), magnetisch ist. Nähert man irgend einen Gegenstand von Eisen, z. B. einen Schlüssel, einer Kompassnadel, so wird dieselbe abgelenkt — ein Beweis, dass der Schlüssel magnetisch ist.

Bei der Annäherung eines Magnetpoles an einen anderen findet man, dass gleichartige Pole sich abstossen und ungleichartige sich anziehen.

6. Magnetische Kraftlinien.

Befindet sich in der Nähe eines Magnets *NS* (Fig. 8) ein kleines Eisenstäbchen *ab*, so wird dasselbe magnetisch, und zwar wird bei *a* ein Südpol und bei *b* ein Nordpol erregt (induziert). Folglich wird *a* von *N* angezogen und von *S* abgestossen, *b* aber wird von *S* angezogen und von *N* abgestossen. Ist nun *ab* sehr klein (z. B. ein Eisenkörnchen), so darf man die Entfernungen der Pole *a* und *b* von *N* resp. *S* einander gleich setzen. Da aber die Kraft, mit der zwei Magnetpole sich anziehen oder abstossen, von der Entfernung (genauer dem Quadrate der Entfernung) der beiden Pole abhängig ist, so dürfen wir die Kraft, mit der *n* von *S* angezogen wird, gleich der Kraft setzen, mit der *s* von *S* abgestossen wird. Entsprechendes gilt für die beiden anderen Kräfte.

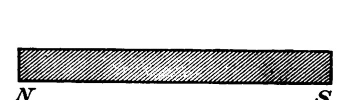


Fig. 8.

ab wird daher durch die vier Kräfte, wie uns die Mechanik lehrt, nur gedreht und stellt sich in eine bestimmte Richtung ein (Richtung der magnetischen Kraft).

Befinden sich nun viele Eisenteilchen in der Nähe eines Magnets (im magnetischen Felde), so gilt für jedes — mit Ausnahme der sehr nahe bei den Polen befindlichen — dasselbe wie für *ab*. Die Teilchen ordnen sich dann zu charakteristischen Linien, den sogenannten Kraftlinien.*)

Will man Kraftlinien darstellen, so verfährt man folgendermassen: Auf einen aufrecht stehenden oder liegenden Magnetstab — je nachdem man die Kraftlinien eines oder beider Pole erhalten will — legt man ein Cartonblatt (horizontal),

*) Die Eisenteilchen sind nicht die Kraftlinien, sie dienen nur dazu, den Verlauf der Kraftlinien sichtbar zu machen.

bestreut dieses mit feinem Eisenpulver und klopft dann mit einem Stäbchen leise gegen das Blatt. Will man die erhaltenen Kraftlinien photographieren, so macht man eine Aufnahme mit Röntgen-Strahlen. Die Vorlagen der beiden Figuren 9 und 10 sind so entstanden. Die Kraftlinien eines Poles erstrecken sich radial vom Pole aus nach allen Richtungen.

Figur 9 zeigt uns die Kraftlinien eines Hufeisenmagnets und Fig. 10 die Kraftlinien, die wir erhielten, als wir zwischen die beiden Pole des Hufeisenmagnets einen aus weichem Eisen angefertigten Ring legten. Wie man sieht, zieht der Ring die Kraftlinien gleichsam in sein Inneres hinein, er bewirkt eine Konzentration der Kraftlinien.

Obschon die Kraftlinien nur eine mathematische Fiktion (gedachte Linien) sind, so spricht man doch von ihnen so, als ob sie wirklich existierten (nicht blos in unserer Vorstellung), ja als ob sie etwas Materielles wären. Dies ist beim Lesen der folgenden Abschnitte zu berücksichtigen.

Jeder Magnetpol ist gleichsam der Träger einer Anzahl von Kraftlinien, die sich von dem Pole aus in die Umgebung erstrecken und sich thunlichst auszubreiten suchen, da sich die Kraftlinien, die aus demselben Pole austreten, gegenseitig abstossen (etwa so, wie die Haare eines Haarbüschels, wenn sie elektrisiert sind). Ebenso weichen sich die Kraftlinien

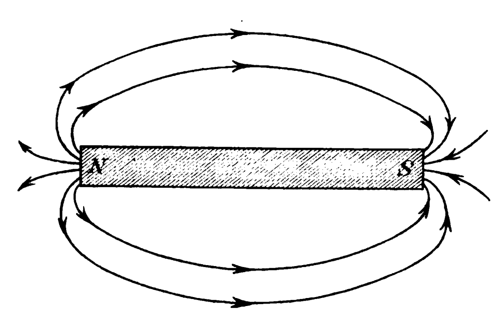
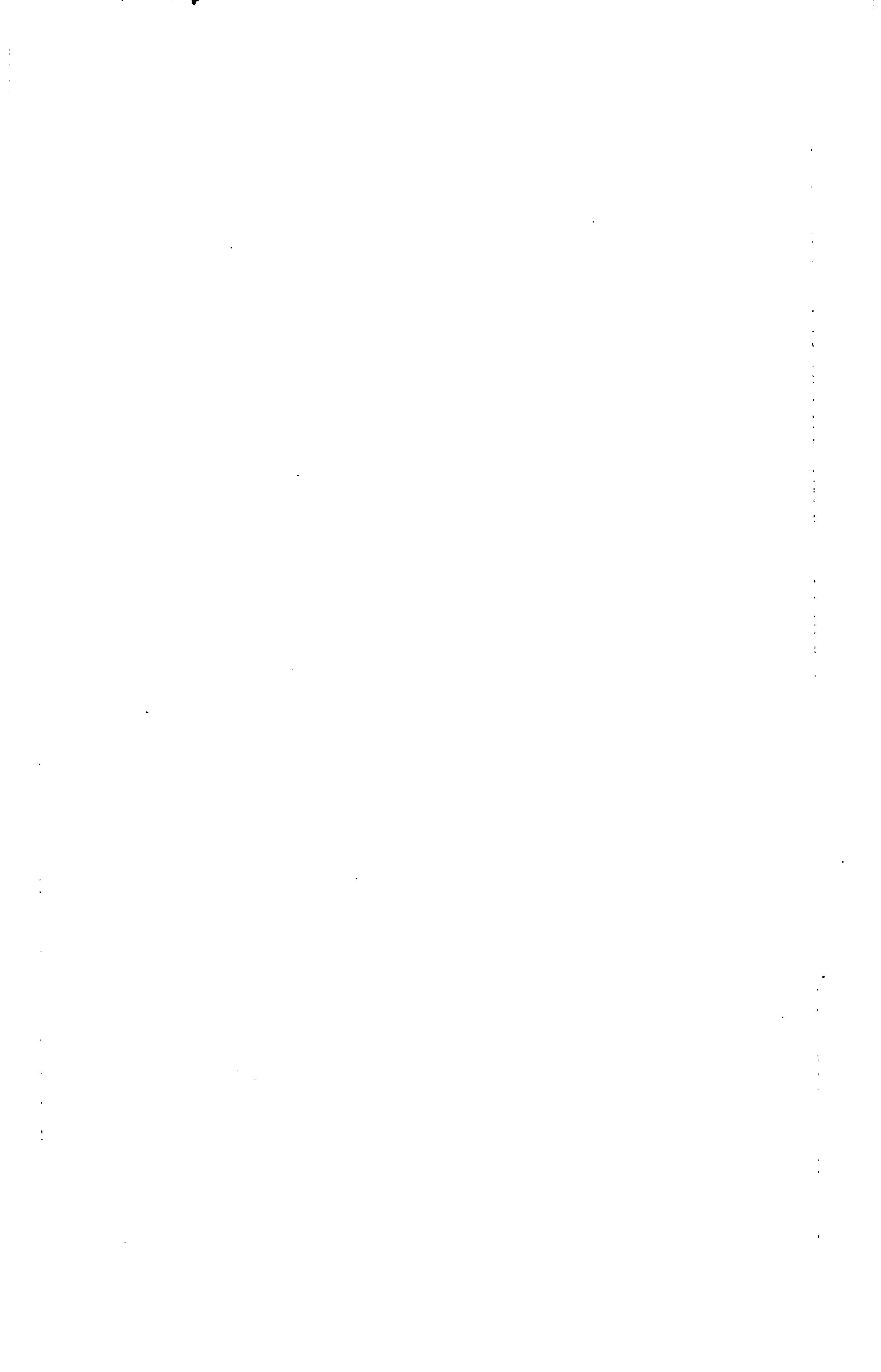
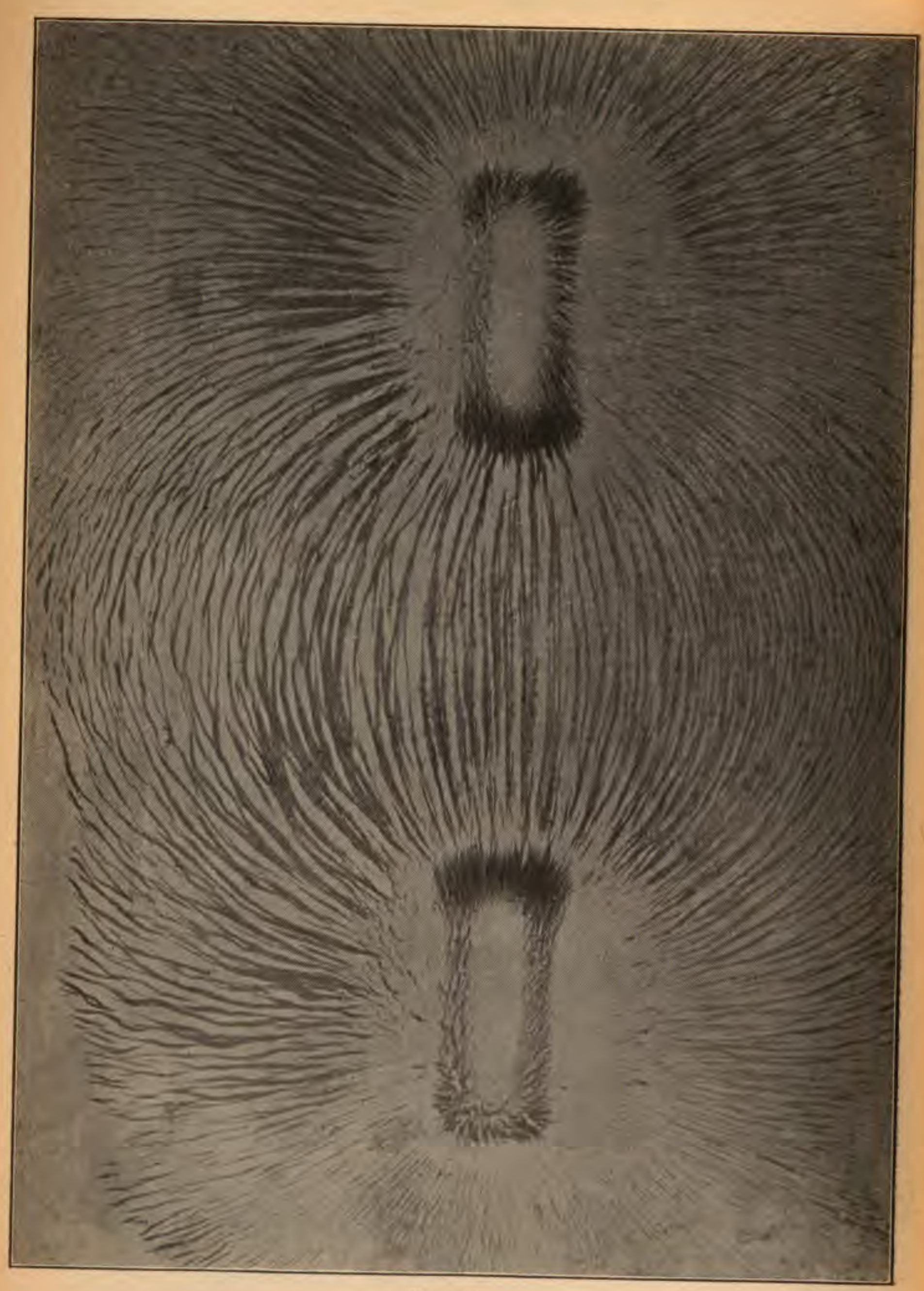


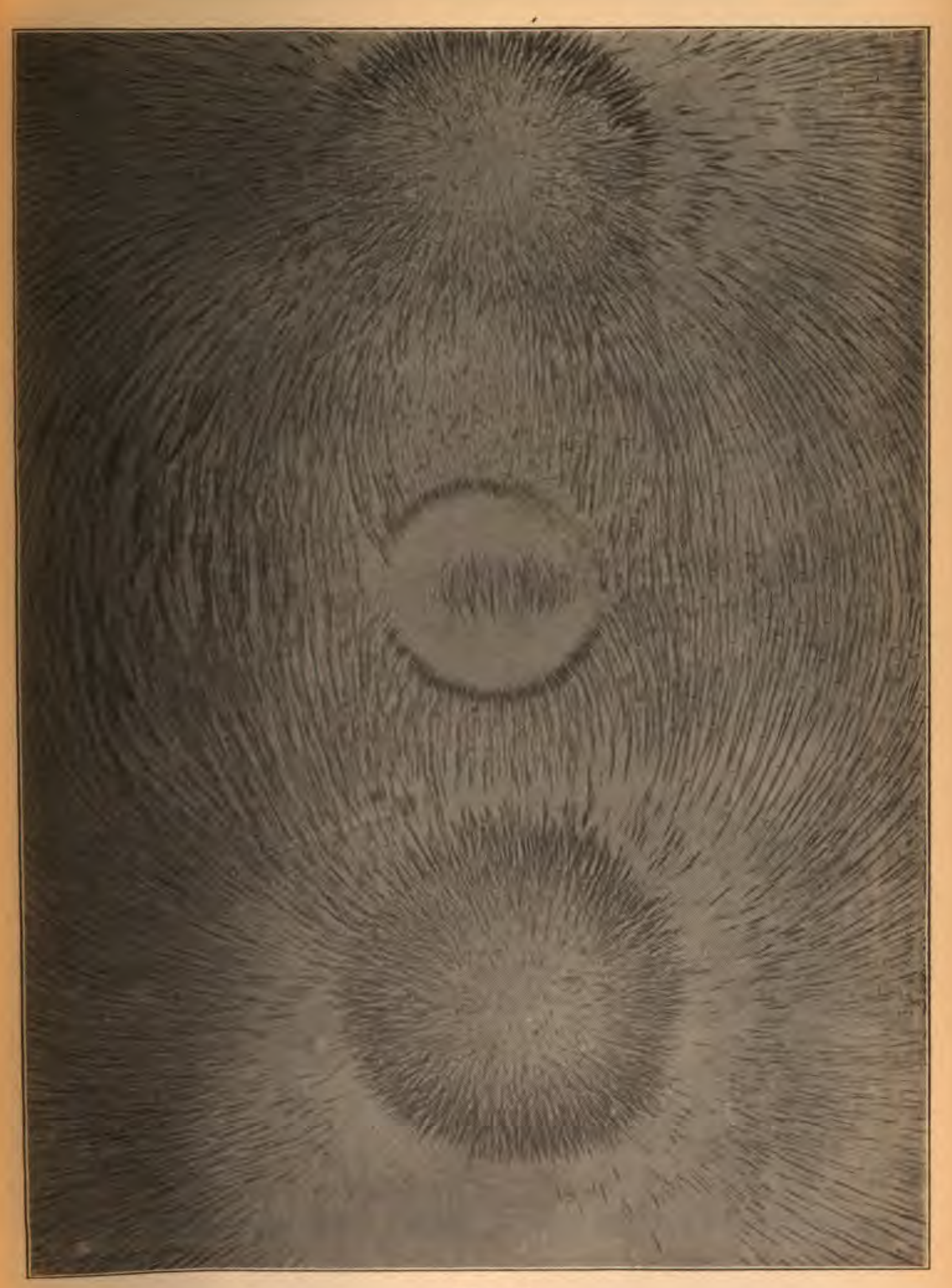
Fig. 11.

zweier gleichnamigen Pole aus, sie bäumen sich gleichsam gegen einander. Dagegen suchen die Kraftlinien eines Nordpoles und eines Südpoles einander auf, legen sich aneinander

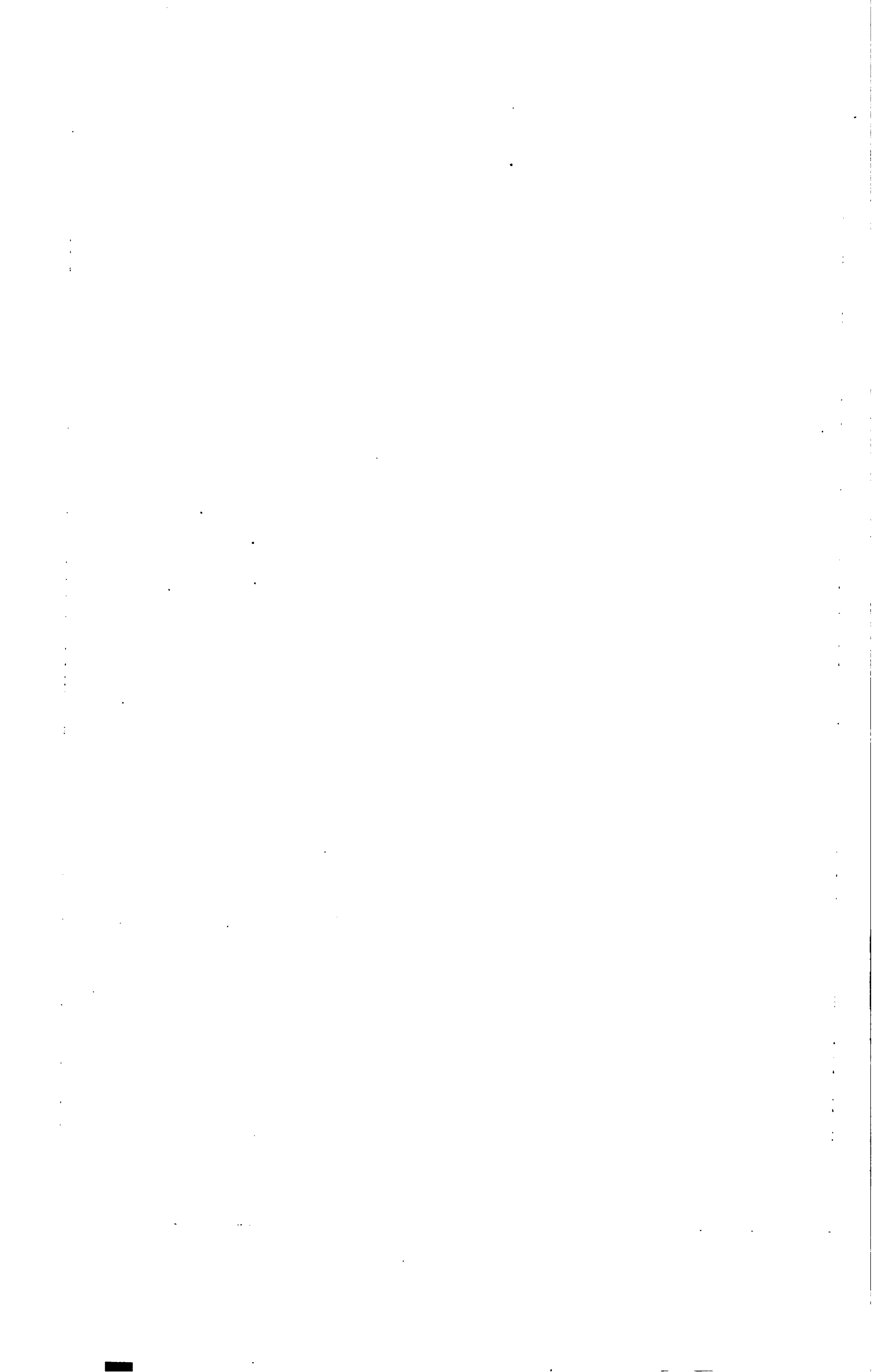




Figur 9.



Figur 10.



und verkürzen sich. Mit Hülfe der Kraftlinientheorie kann man also leicht das Gesetz der Anziehung resp. Abstossung zweier Magnetpole erklären. Wir können aber auch die magnetischen Erscheinungen erklären, wenn wir nur eine Art von Kraftlinien annehmen und sagen: die Kraftlinien treten am Nordpole in den Raum hinein, streben dem Südpole zu und treten dort wieder in den Magnet ein (Fig. 11).

Weiches Eisen, das sich im Bereiche der Kraftlinien (im magnetischen Felde) befindet, wirkt anziehend auf die Kraftlinien; die Kraftlinien bevorzugen den Weg durch das Eisen vor dem Wege durch die Luft, weil Eisen für die Kraftlinien ein guter Leiter ist.

Wir werden später auf die magnetischen Kraftlinien (z. B. bei der Magnetoinduktion) wieder zurückkommen.

Zweites Kapitel.

Die Erzeugung elektrischer Ströme durch Elemente.

7. Das galvanische*) Element.

Giesst man in ein Gefäss verdünnte Schwefelsäure — ca. 10 g Schwefelsäure und 100 g Wasser —, stellt in dasselbe eine Zink- und eine Kupferplatte und verbindet die Platten durch einen Kupferdraht (Fig. 12), so fliesst durch den Draht ein elektrischer Strom. Um das Dasein des elektrischen Stromes sichtbar zu machen, lassen wir denselben um eine Magnetnadel herumfliessen. Die Ablenkung der Magnetnadel zeigt die Existenz des Stromes an (siehe § 10). Der Draht *abc* ist mit Seide übersponnen oder mit einer Schicht einer Substanz überzogen, welche die Elektrizität nicht leitet — man sagt, der Draht ist isoliert. Den Draht *abc* nennen

*) Galvani, Professor der Medicin in Bologna, machte 1789 eine Entdeckung, deren weitere Verfolgung zur Auffindung eines Mittels führte, elektrische Ströme zu erzeugen.

wir den Schliessungsdraht. Wird *abc* entfernt, so ist das Element oder die Kette geöffnet; ist er an den Metallplatten befestigt — die Enden des Drahtes müssen von der isolierenden Hülle befreit und blank gemacht werden —, so ist die Kette geschlossen. Die Metalle, Zink und Kupfer, heissen Polplatten oder kurz die Pole des Elementes, und zwar ist die Kupferplatte der positive (+) und die Zinkplatte der negative (—) Pol. Der elektrische Strom ergiesst sich durch den Draht in der Richtung des Pfeiles, also vom positiven Pole zum negativen.

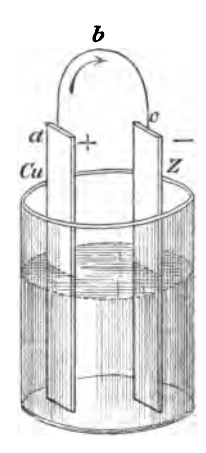


Fig. 12.

Damit das Zink nicht zu stark von der Säure angegriffen werde, wenn der Strom unterbrochen ist, versieht man dasselbe mit einem Ueberzug von Quecksilber — man amalgamiert dasselbe. Das Amalgamieren des Zinkes geschieht folgendermassen: Man reinigt die Oberfläche der Zinkplatte, bis sie blank ist, taucht sie in verdünnte Salzsäure, giesst dann auf die getrocknete Platte einige Tropfen Quecksilber und verreibt dieses mit der Hand oder mit einer Bürste.

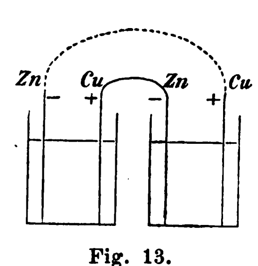


Fig. 13.

Stehen mehrere Elemente zur Verfügung, so verbindet man meist — über die verschiedenen Arten der Schaltung siehe Seite 48 f. — die ungleichnamigen Pole mit einander und befestigt an den ersten und letzten Pol (Fig. 13) den Leitungsdraht. Eine solche Anordnung heisst „galvanische Batterie“.

8. Spannung und Stromstärke.

a) Spannung (Potential).

Wir wollen die Wassermenge, gemessen in ccm (oder g), die man in ein Gefäss giessen muss, wenn man das Niveau des Wassers um 1 cm erhöhen will, die Kapacität (Fassungs-

vermögen) des Gefässes nennen. Man sieht dann sofort ein, dass die Wassermenge, die ein Gefäss enthält, gleich ist der Kapacität mal der Höhe.

Wenn man ein und dieselbe Wärmemenge einmal einem kg Wasser, dann einem kg Eisen, ein drittes Mal einem kg Kupfer zuführt, so wird die Temperatur der drei genannten Stoffe nicht um dieselbe Anzahl von Graden erhöht. Wird z. B. die Temperatur des kg Wasser durch die zugeführte Wärme (eine Kalorie) um 1° C. erhöht, so wird das kg Eisen um ca. 9° C. erwärmt und das Kupfer um ungefähr $10^2/_3$° C. Will man also jeden der drei genannten Stoffe um 1° erwärmen, so muss man verschiedene Wärmemengen zuführen. (Will man bei drei Gefässen, die verschiedene Kapacitäten haben, das Niveau um 1 cm vergrössern, so muss man verschiedene Wassermengen zugiessen.) Man sagt daher: Wasser, Eisen und Kupfer haben verschiedene Wärmekapacitäten. Setzen wir die Wärmekapacität des Wassers gleich 1, so hat Eisen die Wärmekapacität $\frac{1}{9}$ und Kupfer $\frac{1}{10,66}$.

Die Wärmekapacität eines Körpers ist also diejenige Wärmemenge (gemessen in Kalorien), die man 1 kg des Körpers zuführen muss, wenn man eine Temperaturerhöhung von 1° erzielen will.

Es gilt also die Gleichung

$$\text{Wärmemenge} = \text{Kapacität} \times \text{Temperatur},$$

die vollständig der Gleichung

$$\text{Wassermenge} = \text{Kapacität} \times \text{Höhe}$$

entspricht.

Obschon die Elektricität ebensowenig wie das Licht und die Wärme ein Stoff ist, so sprechen wir von ihr doch vielfach so, als ob sie ein Stoff wäre, weil wir das Bestreben haben, Vorgänge und Erscheinungen in der Natur, für die wir eine Erklärung suchen, mit bekannteren Vorgängen und Erscheinungen zu vergleichen. Nun werden wir aber sehen, dass sich die Gesetze des elektrischen Stromes sehr gut mit den Gesetzen, die für fliessendes Wasser gelten, vergleichen lassen.

Daher gebrauchen wir bei der Elektricität ähnliche resp. dieselben Ausdrücke wie beim Wasser. Wir erinnern an die Ausdrücke: der elektrische Strom, die Elektricität fliesst u. s. w. So erklärt es sich, dass wir von Elektricitätsmengen sprechen.

Nehmen wir nun an, wir führten einer isolierten, etwa an einem Seidenfaden aufgehängten Messingkugel ein gewisses Quantum Elektricität zu, dann wieder ein gewisses Quantum und so fort. Die zugeführte Elektricität verteilt sich auf der Oberfläche der Kugel, da die Elektricität das Bestreben hat, sich auszubreiten (wie die Gase) und die Körper, auf denen sie sich befindet, zu verlassen (die Gase haben das Bestreben, abgeschlossene Räume, in denen sie sich befinden, zu verlassen; sie üben einen Druck aus). Würde nun die Kugel nicht von der Luft, die ein sehr schlechter Leiter ist, rings umgeben, so würde sich die Elektricität von der Kugel entfernen. Je mehr Elektricität wir der Kugel zuführen, mit um so grösserer Kraft strebt sie nach aussen (ähnlich, wie wenn eine grosse Menschenmenge sich vor einer Barriere befindet). Das Bestreben der Elektricität, sich auszubreiten, nennen wir Spannung.

Laden wir eine Messingkugel vom Radius 1 cm mit einer gewissen Elektricitätsmenge E und eine Messingkugel vom Radius 2 cm mit einer gleichen Elektricitätsmenge, so hat die Elektricität im ersten Falle eine viermal so grosse Spannung wie im zweiten Falle, da die Oberflächen der beiden Kugeln sich wie 1 zu 4 verhalten. Die erste Kugel hat eine kleinere Kapacität wie die zweite. Setzen wir die Kapacität der ersten Kugel gleich 1, so ist die der zweiten Kugel 2.

Der Quotient $\frac{E}{r}$, wo r den Radius der Kugel bedeutet, wird das Potential genannt. Das Potential ist im ersten Falle gleich $\frac{E}{1} = E$ und im zweiten Falle $\frac{E}{2}$. Das Produkt aus der Kapacität und dem Potentiale hat in beiden Fällen denselben Wert E. Wir können daher sagen: das Produkt aus der Kapacität und dem Potentiale ist ein Mass für die Elektricitätsmenge und schreiben:

$$\text{Elektricitätsmenge} = \text{Kapacität} \times \text{Potential}.$$

Das Potential entspricht also dem, was man bei der Wärme die Temperatur nennt. (Genaueres über das Potential s. im Anhange.)

Hätten alle Körper auf der Erde, wir selbst mit eingeschlossen, dieselbe Temperatur, etwa 10°, und würden sie diese Temperatur stets beibehalten, so würden wir das Dasein der Wärme gar nicht nachweisen können, weder durch das Gefühl noch mit Hülfe des Thermometers.

Die Erde und daher auch alles, was sich auf der Erde befindet, hat einen bestimmten elektrischen Zustand. Diesen elektrischen Zustand können wir, da ihn alle Körper besitzen, nicht nachweisen, wenn er nicht erhöht oder erniedrigt wird; es ist gerade so, wie bei der Wärme. Ist der elektrische Zustand eines Körpers — sein Potential — höher als derjenige der Erde, so nennen wir ihn positiv elektrisch, ist er niedriger als der der Erde, so sagen wir: er ist negativ elektrisch. Das Potential der Erde entspricht also dem, was wir bei der Wärme den Gefrierpunkt nennen. Wie wir nun von einem Körper, der die Temperatur des schmelzenden Eises hat, sagen: er hat die Temperatur Null Grad, so sagen wir von einem Körper, der das Potential der Erde hat: sein Potential ist gleich Null.

Wenn man zwei gleich schwere Eisenstücke, etwa zwei gleich grosse Kugeln, gleich stark erwärmt*) und sie dann durch einen Draht verbindet, so behalten beide Körper dieselbe Temperatur, die sie vor der leitenden Verbindung hatten, und kühlen sich, Wärme an die Umgebung abgebend, gleichmässig ab. Haben aber die beiden Kugeln verschiedene Temperaturen, die eine etwa 100°, die andere 50°, so fliesst Wärme durch den Draht von *a* nach *b* (Fig. 14) und zwar so lange, bis *a* und *b* dieselbe Temperatur haben.

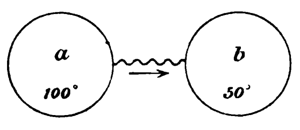


Fig. 14.

Sorgt man auf irgend eine Weise dafür, dass *a* eine Zeit lang eine bestimmte Temperatur beibehält, etwa in der Weise, dass man *a* in ein Gefäss

*) Die Wärme verteilt sich gleichmässig im Innern der Körper, die Elektricität verbreitet sich nur auf der Oberfläche der Leiter.

mit siedendem Wasser bringt und das Wasser am Sieden hält, entzieht man ferner *b* die Wärme, die von *a* zuströmt, indem man *b* in schmelzendes Eis legt, so fliesst, so lange der Versuch dauert, Wärme von *a* nach *b*, ohne dass sie sich bei *b* bemerkbar macht. Wir erhalten also einen gleichmässigen, continuierlichen Strom.

Verbinden wir einen positiv elektrischen Körper mit der Erde durch einen Draht, so fliesst Elektricität von dem Körper zur Erde ab, und der Körper nimmt das Potential der Erde, d. h. das Potential Null an. Verbinden wir aber einen negativ elektrischen Körper leitend mit der Erde, so fliesst Elektricität von der Erde zu dem Körper so lange, bis er das Potential der Erde (Null) hat.

Da die Erdkugel sehr gross ist, so wird durch Zu- oder Abfluss einer verhältnismässig kleinen Elektricitätsmenge ihr Potential nicht geändert.

Hat endlich ein Körper das Potential der Erde, und verbindet man ihn mit derselben, so fliesst keine Elektricität durch die leitende Verbindung.

Verbindet man zwei Messingkugeln, die verschiedene Potentiale haben, durch einen Leiter miteinander, so fliesst Elektricität von der Kugel, die das höhere Potential hat, zu der Kugel, die das niedrigere Potential hat, und zwar so lange, bis beide Kugeln dasselbe Potential haben. Die Bewegung der Elektricität von einem Körper zum andern wird also nicht durch die Elektricitätsmengen, sondern durch die Grösse der Potentiale bedingt. Die Masseinheit für das Potential nennt man 1 Volt*) (siehe S. 60).

b) Stromstärke.

Um den Begriff Stromstärke zu erläutern, wollen wir die fliessende Elektricität mit dem fliessenden Wasser vergleichen. Durch eine Pumpe *P* (Fig. 15) werde in jeder Sekunde 1 Liter Wasser in das Reservoir R_1 gehoben; gerade soviel Wasser

---

*) Die elektrischen Masseinheiten (Pariser Elektriker-Kongress 1884) sind nach berühmten Physikern benannt worden.

möge durch die Röhren *a* und *b* in jeder Sekunde abfliessen. Wir erhalten dann, solange die Pumpe in Thätigkeit ist, einen ununterbrochenen Wasserstrom. Die durch unsere Figur veranschaulichte Vorrichtung können wir mit einer Stromquelle vergleichen: dem Wasser entspricht die Elektricität, den verschiedenen Niveaux*) in den Reservoirs R_1 und R_2 entsprechen die verschiedenen Potentiale der Pole, der Rohrverbindung entspricht der Verbindungsdraht, der die Niveaudifferenz stets wieder herstellenden Kraft die Kraft in einer Stromquelle, die die Potentialdifferenz stets wieder herstellt. Bei unserer Vorrichtung (Fig. 15) fliesst durch jeden Querschnitt der Röhre *a*, aber auch durch jeden Querschnitt der engeren Röhre *b* in der Sekunde 1 Liter Wasser hindurch. Wir nennen nun die Wassermenge, die in einer Sekunde durch irgend einen Querschnitt der Rohrleitung fliesst, die Stromstärke. Analoges gilt für die Elektricität: Fliesst Elektricität durch eine einfache, d. h. nicht verzweigte Leitung, die aus Drähten von verschiedenem Querschnitte besteht, so fliesst durch jeden Querschnitt der Leitung in derselben Zeit dieselbe Elektricitätsmenge. Man nennt die in 1 Sekunde durch irgend einen Querschnitt fliessende Elektricitätsmenge die Stromstärke.

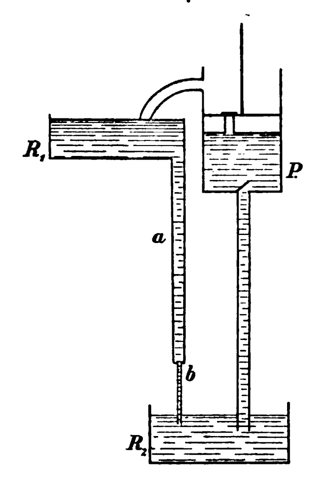


Fig. 15.

Die Masseinheit für die Stromstärke ist das Ampère (siehe S. 58).

Vergleichen wir den elektrischen Strom mit einer Wasserkraft, so entsprechen sich:

Gefälle und Spannung (genauer Spannungsdifferenz),

Wassermasse pro Sekunde und Stromstärke.

---

*) Wir verstehen unter Niveau die Entfernung der Wasseroberfläche von der Erde.

9. Die Entstehung des Stromes im galvanischen Elemente.

Stellt man eine Zinkplatte in angesäuertes Wasser, so tritt eine Kraft in Thätigkeit, die wir die elektrische Scheidungskraft nennen. Diese bewirkt, dass die Zinkplatte negativ, die Flüssigkeit positiv elektrisch wird und verhindert einen Ausgleich der Elektricitäten. Angenommen die Zinkplatte erhält infolge der Thätigkeit der elektrischen Scheidungskraft das Potential — E, dann herrscht in der Flüssigkeit das Potential + E. Tauchen wir nun die Kupferplatte *Cu* (Fig. 16) in dieselbe Flüssigkeit, so wird das Kupfer, indem positive Elektricität aus dem Wasser auf die Platte fliesst, ebenfalls positiv elektrisch, und es herrscht auf ihr dasselbe Potential wie in der Flüssigkeit (+ E). Nun wirkt aber auch an der Berührungsstelle *Cu* — Wasser eine elektrische Scheidungskraft, welche bewirkt, dass das Kupfer ein negatives Potential erhält und das Wasser ein positives. Nennen wir das Potential, das die Kupferplatte hätte, wenn sie allein in dem Gefässe stände, — e, so nimmt das Wasser das Potential + e an. e ist aber, wie durch Versuche bewiesen worden ist, kleiner als E. Befinden sich also Zink und Kupfer in derselben Flüssigkeit (in demselben Gefässe), so besitzt die Zinkplatte das Potential — E + e (— E infolge der elektrischen Scheidungskraft *Zn* — Wasser, + e infolge der elektrischen Scheidungskraft *Cu* — Wasser) und die Kupferplatte das Potential — e + E. Da nun E grösser ist als e, so ist die Differenz e — E negativ und die Differenz E — e positiv, d. h. die Zinkplatte hat ein positives Potential und die Kupferplatte ein gerade so grosses negatives Potential [denn E — e = — (e — E)].

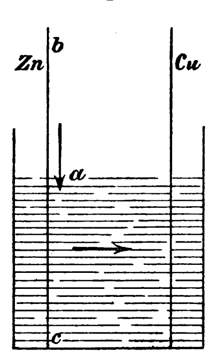


Fig. 16.

Schliesst man nun das geöffnete Element durch einen Draht, so fliesst Elektricität von der Kupferplatte durch den Draht zum Zink, da das Kupfer ein höheres Potential hat wie das Zink und die Elektricität die Potentialdifferenz auszugleichen

sucht. Die elektrischen Scheidungskräfte halten aber die Potentialdifferenz aufrecht. Je grösser die Potentialdifferenz ist, um so mehr Elektricität fliesst (unter sonst gleichen Umständen) in jeder Sekunde durch die Leitung. Man nennt die Potentialdifferenz die elektromotorische Kraft und misst dieselbe in Volt. Hat z. B. in Fig. 16 die Zinkplatte das Potential — $^1/_2$ Volt und die Kupferplatte + $^1/_2$ Volt, so ist die elektromotorische Kraft 1 Volt.

Nun fragt es sich: auf Kosten welcher Energie entsteht in dem Elemente der elektrische Strom? Fliesst der elektrische Strom durch das Element, so gehen chemische Processe vor sich (Zersetzung und Verbindung). Bei chemischen Zersetzungen wird aber, wie wir mitgeteilt haben, Energie (Wärme) verbraucht, bei chemischen Verbindungen wird Wärme frei. Nun überwiegt bei den chemischen Vorgängen im geschlossenen Elemente die frei werdende Wärme, der Ueberschuss tritt als elektrische Energie zu Tage. (Zink wird verbraucht, gleichsam verbrannt. Zink ist aber ein teures Heizmaterial.)

Dass die Potentialdifferenz unabhängig ist von der Grösse der Polplatten, wird nach den vorhergegangenen Erörterungen ohne weiteres klar sein. (Im übrigen siehe den Paragraphen über den „Widerstand".)

10. Die galvanische Polarisation — die Zersetzung des Wassers durch den elektrischen Strom.

Bei dem auf Seite 13 beschriebenen galvanischen Elemente nimmt die Stärke des elektrischen Stromes bald ab, und nach einiger Zeit hört das Element auf, einen Strom zu liefern.

Diese Erscheinung hängt mit den chemischen Vorgängen im Elemente und besonders mit der Zersetzung des Wassers durch den elektrischen Strom zusammen.

Wenn man einen elektrischen Strom durch verdünnte Schwefelsäure schickt, so wird, wie wir später sehen werden (siehe Elektrolyse), das Wasser in Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O) zersetzt. Die Versuchsanordnung ist aus der Figur 17 (S. 22) ersichtlich: die beiden Striche stellen die Pole der

Batterie (ein Element genügt für den Versuch nicht), d. h. die erste und letzte Platte, an die die Leitungsdrähte befestigt werden, dar. A ist der Wasserzersetzungsapparat. Er besteht aus einem cylindrischen Glase, das durch einen Deckel verschlossen wird. Auf dem Deckel sieht man die Klemmschrauben K_1 und K_2; diese sind durch einen kurzen Draht mit den Platinblechen E_1 und E_2, den sogenannten Elektroden, verbunden. Der Abstand der beiden Elektroden muss möglichst klein sein. Man beobachtet nun, sobald der Strom, der in dem Zersetzungsapparate von E_1 nach E_2 fliesst, geschlossen ist, dass an den Elektroden Gasbläschen auftreten. Die Gase steigen in die Höhe, und das Gasgemenge, welches wir Knallgas nennen, entweicht durch das Röhrchen. Taucht man das Ende des Röhrchens in Seifenwasser, so bilden sich Knallgasblasen. Diese Blasen explodieren mit scharfem Knalle, wenn man sie anzündet. (Man achte darauf, dass man mit der Flamme der Öffnung des Röhrchens nicht zu nahe komme.)

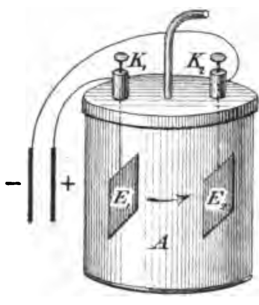


Fig. 17.

Unterbricht man den Batteriestrom nach einiger Zeit, und verbindet man die Klemmen K_1 und K_2 mit einem Galvanoskope, d. h. einem Apparate, der den Zweck hat, elektrische Ströme sichtbar zu machen, so beobachtet man eine Ablenkung der Magnetnadel. Dieser Versuch zeigt, dass der Wasserzersetzungsapparat ein galvanisches Element geworden ist. Wir nennen den Strom, den der Apparat liefert, Polarisationsstrom. Die elektromotorische Kraft des Polarisationsstromes ist ins Leben gerufen worden, weil sich die Elektroden mit Gasbläschen bedeckt haben.

Der elektrische Strom fliesst nun im Innern des galvanischen Elementes vom Zink durch die Flüssigkeit zum Kupfer. Infolge dessen wird das Wasser des Elementes in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt; es tritt an der Kupferplatte, die der Elektrode E_2 des Wasserzersetzungsapparates (Fig. 17) ent-

spricht, freier Wasserstoff auf, der nach einiger Zeit als dünne Schicht die Kupferplatte bedeckt. Durch die Berührung von H und Cu wird aber eine neue elektromotorische Kraft ins Leben gerufen, die einen Strom erzeugt, der dem „Hauptstrome“ entgegengesetzt gerichtet ist. Durch den Polarisationsstrom wird der Strom des Elementes geschwächt und schliesslich ganz aufgehoben.

11. Die konstanten Elemente.

Elemente, die längere Zeit hindurch einen fast gleich starken Strom liefern, nennt man konstante Elemente. Bei denselben wird die Wasserstoffablagerung auf der positiven Polplatte verhindert, die Polarisation also und damit der Grund der Schwächung des Stromes beseitigt.

Bei fast allen konstanten Elementen ist der eine Pol amalgamiertes Zink, der andere ist bei vielen Retorten- oder Gaskohle, d. h. Kohle, die sich an den Wänden der bei der Gasfabrikation benutzten Retorten ansetzt.

Wir beschränken uns darauf, von der grossen Zahl der verschiedenen konstanten Ketten die folgenden zu beschreiben.

a) Die Daniell'sche Kette ist die älteste konstante Kette. Zink taucht in verdünnte Schwefelsäure und Kupfer in schwefelsaures Kupfer oder Kupfervitriol ($CuSO_4$). Die beiden Flüssigkeiten werden durch einen porösen Thoncylinder, die sogenannte Thonzelle, die dem Strome den Durchgang gestattet, von einander getrennt. Der elektrische Strom fliesst ausserhalb des Elementes vom Kupfer zum Zink, innerhalb desselben vom Zink zum Kupfer. Fig. 18 (S. 24) ist ein Querschnitt des Elementes.

b) Einen starken Strom liefert das Bunsen'sche Element. In die Thonzelle Fig. 18 stellt man eine Kohlenplatte und giesst dann concentrierte Salpetersäure zu; im übrigen ist die Zusammensetzung dieselbe wie beim Daniell'schen Elemente. (Das Zink muss gut amalgamiert sein; man mischt 100 ccm Wasser mit 5 ccm Schwefelsäure.)

c) Das Leclanché'sche Element. Ein solches stellt die

nachstehende Fig. 19 dar. In einem Glasgefässe steht ein Thoncylinder, der mit einem Gemenge von Braunstein und Kohle — Gaskohle — angefüllt ist und die positive Polplatte, nämlich eine Platte von Retortenkohle, enthält. Die Thonzelle

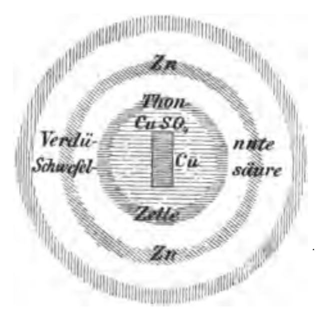


Fig. 18.

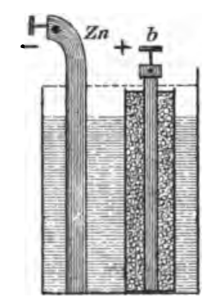


Fig. 19.

ist oben durch eine Schicht Pech verschlossen. Eine Glasröhre, die in die Pechschicht eingelassen ist, stellt eine Verbindung des Innern mit der atmosphärischen Luft her. Diese Verbindung ist nötig, weil durch die Wand des Thoncylinders Flüssigkeit in das Innere der Zelle eindringt, welche Luft verdrängt, und sich ferner infolge der Thätigkeit des Stromes Gase entwickeln. In das Glasgefäss wird eine concentrierte Lösung von Salmiak (Chlorammonium) gegossen. Eine solche erhält man, wenn man Wasser von der Zimmertemperatur so lange Salmiak zusetzt, bis kein Salz mehr gelöst wird. In die Salmiaklösung stellt man eine Zinkstange, an die eine Klemmschraube befestigt ist. Schliesst man das Element, so fliesst der Strom durch den Verbindungsdraht von der Kohle zum Zink und in dem Elemente selbst vom Zink zur Kohle. Der Salmiak und das Wasser werden zersetzt; der entstandene Wasserstoff entzieht dem Braunstein Sauerstoff, an dem dieser reich ist, und vereinigt sich mit ihm zu Wasser. Ausser Wasser bilden sich Chlorzink und Ammoniak, welch letzteres an seinem scharfen Geruche erkennbar ist. Bei nicht zu starker Ausnutzung, z. B. bei elektrischen Klingelanlagen, kann das Element über ein Jahr in Anwendung bleiben, wenn man ab und zu den Zinkstab reinigt und Wasser sowie Salmiak zusetzt.

Den Thoncylinder lässt man vielfach weg und legt auf den Kohlenpol beiderseits eine Platte, die aus einem Gemenge von Kohle und Braunstein nach Zusatz eines Bindemittels gepresst wird. Die drei Platten werden durch zwei starke Gummibänder zusammengehalten.

Eine Modifikation des Elementes von Leclanché ist die von Kaiser und Schmidt konstruierte Braunsteinkette (Fig. 20). Auf dem Boden des Glases befindet sich ein Gemenge von Kohlen- und Braunsteinstücken. Das untere Ende der Kohlenplatte *C* ist von diesem Gemenge umgeben. In die Salmiaklösung taucht die Zinkplatte *Zn*. Diese hat drei Löcher, in die ein an dem Holzdeckel *H* befestigter Stift hineinpasst. Man kann also die Zinkplatte tiefer in die Flüssigkeit hineinsenken oder aus ihr herausheben. (*Zn* darf das auf dem Boden befindliche Gemenge nicht berühren.)

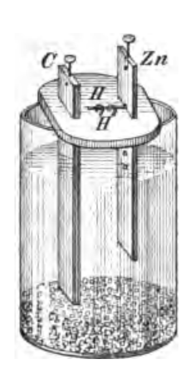


Fig. 20.

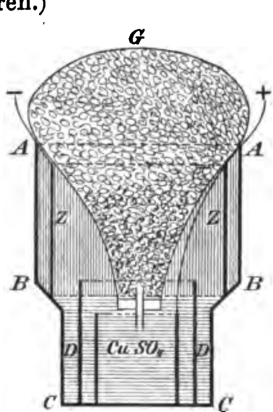


Fig. 21.

d) Das Meidinger'sche Element wird an den Postämtern noch vielfach benutzt. Das Glasgefäss *ABC* (Fig. 21) verjüngt sich unten etwas. Dadurch entsteht im Innern ein Absatz, auf dem der Zinkcylinder *Z* ruht. In dem engern Teile *BC* steht ein zweites Glasgefäss *D* mit einem Kupfercylinder. An letzteren ist ein Kupferdraht angelötet, der mit einer isolierenden Guttaperchahülle umgeben ist. Will man das Element ansetzen, so giesst man in das kleinere Glas concentrierte Kupfervitriollösung; dann füllt man das grosse Glas

vorsichtig (den Strahl an der Wand entlang laufen lassend) mit einer concentrierten Bittersalzlösung etwa bis zu $^3/_4$ seiner Höhe an. Da diese ein geringeres specifisches Gewicht als die Kupfervitriollösung hat, so schwimmt sie auf der letzteren. Der Glasballon *G* wird nach Entfernung des den Hals desselben verschliessenden Korkes mit Kupfervitriolstücken angefüllt, wieder verschlossen und dann behutsam auf *ABC* aufgesetzt. Das Ende des Halses taucht in die Kupfervitriollösung. Ist das Element geschlossen, so wird schwefelsaures Kupfer zersetzt unter Bildung von Kupfer. In demselben Masse nun, in dem Kupfervitriol verbraucht wird, löst sich das in dem Ballon befindliche Salz auf, so dass die Lösung stets concentriert bleibt. Es geht nämlich durch den Kork ein Glasröhrchen hindurch, durch welches die Flüssigkeit von *D* in den Hals des Ballons eindringen kann.

e) Einen verhältnismässig starken Strom liefert — allerdings nicht lange — das Chromsäureelement. Eine Zink- und eine Kohlenplatte tauchen in Chromsäure, die sehr sauerstoffreich ist. Da reine Chromsäure ziemlich teuer ist, so benutzt man eine Mischung, die man auf folgende Weise darstellt: Aus 93 g pulverisiertem doppeltchromsaurem Kali und 171 g concentrierter Schwefelsäure wird, indem man das Pulver nach und nach der Säure zusetzt und umrührt, ein gleichförmiger Brei hergestellt. Diesem Brei giesst man 900 g Wasser zu. Die so erhaltene Flüssigkeit sieht anfangs schön gelbrot aus, färbt sich aber, wenn der Strom durch sie hindurchgeht, bald dunkel. Da die Chromsäure das Zink stark angreift, so muss das Metall, sobald man das Element benutzt hat, aus derselben entfernt werden. Bei den Tauch- oder Flaschenelementen ist die Zinkplatte daher an einem Messingstabe befestigt, der durch eine Hülse mit Schraube hindurchgeht, so dass man die Zinkplatte heben und senken und in jeder beliebigen Höhe befestigen kann.

f) Sehr bequem im Gebrauche sind die Trockenelemente. Das Trockenelement von Hellesen hat die Form eines Kästchens. Dieses ist mit einer Masse, deren Zusammensetzung geheim gehalten wird, angefüllt. Die Wand (aus Zink) ist der eine, ein Kohlenstab in der Mitte der andere Pol.

Drittes Kapitel.

Wechselwirkungen zwischen Elektricität und Magnetismus.

---

12. Bewegungen der Magnete durch den Strom und der Stromkreise durch Magnete.

Nähert man einen elektrisierten Körper, z. B. eine mit Seidenzeug geriebene Glasstange, einer leicht beweglichen Magnetnadel, so beobachtet man eine Bewegung, eine Ablenkung der Nadel. Dieselbe Beobachtung macht man, wenn die Magnetnadel einem Drahte genähert wird, durch den ein elektrischer Strom fliesst. Die Ablenkung der Nadel wird grösser, wenn der Strom um die Nadel herumfliesst. Aus Fig. 22 ist

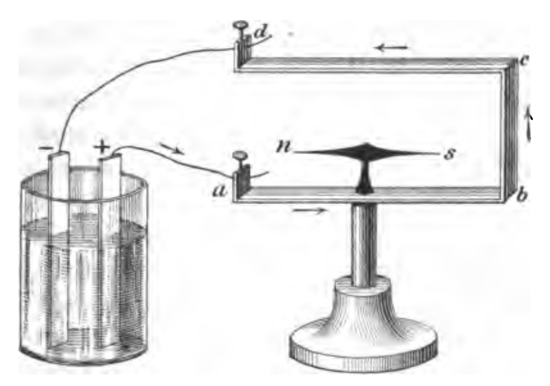


Fig. 22.

die Anordnung des diesbezüglichen Versuches ersichtlich. *abcd* ist ein rechteckig gebogener Messingstreifen, der bei *a* und *d* Klemmschrauben trägt und auf einer die Elektricität nicht leitenden (isolierenden) Säule ruht. Der Apparat wird so aufgestellt, dass sich die ruhende Magnetnadel im Innern des Rahmens befindet, also parallel *ab* und *cd* läuft. Um eine Erschütterung der Nadel zu vermeiden, befestigt man zuerst je ein Drahtende bei *a*, *d* und an den einen Pol und schliesst

den Strom, indem man das noch freie Drahtende an dem andern Pole des Elementes einklemmt (Oersted's Fundamentalversuch). Die Richtung der Ablenkung der Nadel kann man mit Hülfe der Ampère'schen Regel oder mit Hülfe der sogenannten Handregel ermitteln, der Müller in seinem Lehrbuch der Physik und Meteorologie folgende Fassung giebt: „Man halte die rechte Hand ausgestreckt parallel dem Stromleiter in solcher Lage, dass die Fingerspitzen in der Richtung des (positiven) Stromes*), die innere Handfläche gegen den Magnet gerichtet ist, dann zeigt der abgestreckte Daumen die Richtung an, nach welcher der Nordpol abgelenkt wird.“ Bei der Versuchsanordnung, wie sie durch die Fig. 22 angedeutet wird, bewegt sich der Nordpol *n* nach vorn (*a b*, *b c* und *c d* wirken in demselben Sinne ablenkend auf *n s* ein).

Je stärker der Strom ist, um so grösser ist die Ablenkung der Magnetnadel. Man kann daher die Ablenkung der Magnete durch den elektrischen Strom benutzen, 1) um zu prüfen, ob ein Element oder eine Batterie in Ordnung, d. h. ob ein elektrischer Strom vorhanden ist, 2) um die Stärke elektrischer Ströme mit einander zu vergleichen oder zu messen. Apparate, die die Aufgabe haben, das Dasein elektrischer Ströme sichtbar zu machen, nennt man Galvanoskope, und solche, die benutzt werden, die Stärke eines Stromes zu messen, Galvanometer. Selbstverständlich ist ein Galvanometer zugleich auch ein Galvanoskop.

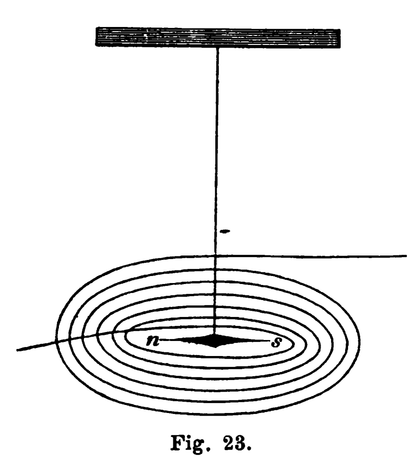


Fig. 23.

Um die Einwirkung des elektrischen Stromes auf die

*) Der Strom würde also, wenn die rechte Hand in den Stromkreis eingeschaltet wäre, an der Handwurzel ein- und an den Fingerspitzen austreten.

Magnetnadel zu verstärken, führt man einen isolierten Draht in vielen Windungen um einen leicht beweglichen Magnet (Fig. 23), der sich zwischen den Windungen des Drahtes befindet, herum (Multiplikatoren). Man nimmt isolierten Draht, damit der Strom gezwungen wird, durch alle Windungen zu fliessen. Die Multiplikatoren sind sehr empfindliche Apparate; selbst ganz schwache Ströme bewirken noch eine deutliche Ablenkung der Magnetnadel.

Eine Abbildung eines empfindlichen Galvanoskops (Multiplikators) ist die Fig. 24. Der Draht ist auf dem rechteckigen Rahmen, der unter der in 360 Grade eingeteilten horizontalen Scheibe sichtbar ist, aufgewickelt. Die Drahtenden sind an zwei seitlichen Klemmschrauben befestigt (in der Figur ist nur eine sichtbar). Der Strom wirkt ablenkend auf ein sogenanntes astatisches Nadelpaar. Ein solches besteht aus zwei fest miteinander verbundenen Magneten, die so gerichtet sind, dass der Nordpol des einen Magnets senkrecht unter dem Südpole des anderen Magnets liegt. Bei dieser Anordnung ist die richtende Kraft des Erdmagnetismus ausserordentlich klein. Das astatische Nadelpaar ist an einem Seidenfaden aufgehängt, der oben über die Achse einer Schraube geschlungen ist, damit man das Nadelpaar heben und senken kann. Der Zeiger über der Skala ist mit der Achse des Magnetpaares fest verbunden und macht die Ablenkungen sichtbar.

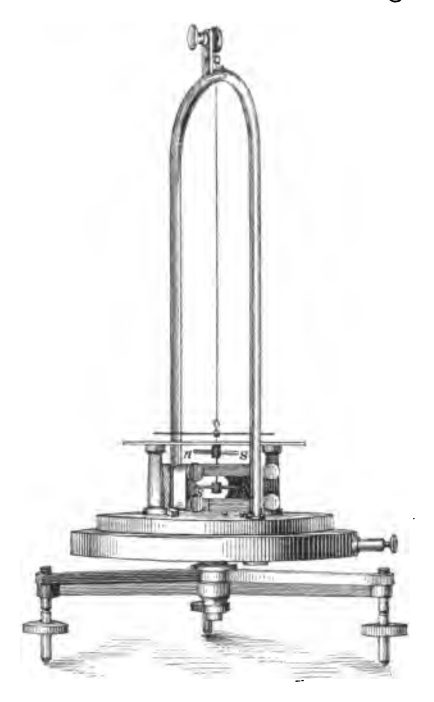


Fig. 24.

Wir haben eben gesehen, dass der elektrische Strom auf Magnete ablenkend wirkt. Die folgenden Versuche werden uns zeigen, dass ein elektrischer Strom auf einen Magnet gerade so wirkt wie ein Magnet. Wir befestigen eine leichte Magnetnadel mit Wachs auf einer ca. 1 cm dicken Korkscheibe und lassen den Kork nebst Magnetnadel auf Wasser schwimmen. Auf einen Holzstab wickeln wir einen langen isolierten Draht, so dass die Windungen dicht nebeneinander liegen und den ganzen Holzstab bedecken; die freien Enden des Drahtes verbinden wir mit den Polen einer kräftigen Stromquelle. Nähern wir nun das eine Ende des Stabes der schwimmenden Nadel, so finden wir, dass der eine Magnetpol angezogen, der andere aber abgestossen wird, und dass die Nadel dem Stabe folgt oder sich von ihm entfernt. Kehren wir den Stab um, so wird derjenige Pol angezogen, der eben abgestossen wurde. Die Bewegungen der Nadel erfolgen gerade so, als ob der Holzstab ein Magnet wäre. Da die einzelnen Windungen dicht nebeneinander liegen, so können wir jede Windung als einen Kreis ansehen, auf dessen Ebene die Achse des Holzstabes senkrecht steht. Die Wirkung eines Stromkreises auf einen Magnet ist also dieselbe, wie die eines senkrecht auf dem Stromkreise stehenden Magnets*). Bei dem durch die Figur 22 veranschaulichten Versuche hat man sich den Magnet, der den Stromkreis vertreten kann, senkrecht zur Ebene des rechteckigen Rahmens zu denken (durch den Mittelpunkt gehend). Dieser gedachte Magnet sucht die Magnetnadel parallel seiner Achse zu stellen; diesem Bestreben wirkt die erdmagnetische Kraft entgegen.

Unter einem Solenoid (σωλήν = Röhre) versteht man eine vom Strome durchflossene Drahtspirale (bei dem vorigen Versuche haben wir ein Solenoid benutzt). Jede einzelne Windung kann man als einen Stromkreis ansehen. Die Gerade, die die Mittelpunkte der einzelnen Kreise verbindet, nennt man die Achse des Solenoids. Das gezeichnete Solenoid ist ein rechts

*) Bei dem vorigen Versuche addieren sich die Wirkungen der einzelnen Stromkreise.

gewundenes (Fig. 25). Tritt nun der positive Strom bei *a* ein, so verhält sich das rechte Ende wie ein Südpol. Nähern wir dem Solenoid einen Eisenstab *cd*, so wird derselbe magnetisch, und zwar entsteht bei *c* ein Nordpol. *cd* wird daher in das Solenoid hineingezogen, und zwar so lange, bis seine Mittelebene durch die Mitte der Achse des Solenoids geht.

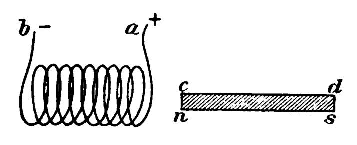


Fig. 25.

Um nachzuweisen, dass ein Stromkreis von einem Magnet abgelenkt wird, bedient man sich des Ampèreschen Gestelles. Ein solches ist in Fig. 26 abgebildet. In die Näpfchen *n* und *n'* giesst man einige Tropfen Quecksilber. Wenn der Stromkreis leicht beweglich ist, so stellt er sich so, dass seine Achse parallel einer Kompassnadel läuft (unter dem Einflusse des Erdmagnetismus); nähert man einen Magnet, so erfolgt eine Drehung des Stromkreises u. s. w.

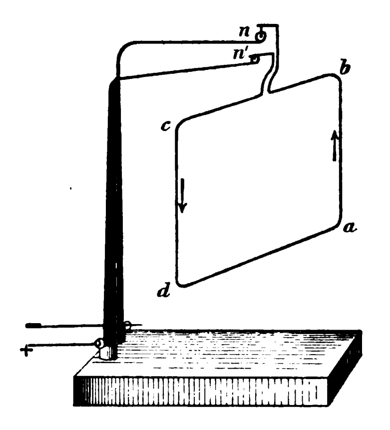


Fig. 26.

13. Magnetisierung durch den Strom (Elektromagnete).

Wickelt man einen längeren isolierten Draht auf einen Stab weichen Eisens und lässt durch den Draht einen elektrischen Strom fliessen, so wird der Eisenstab magnetisch; man kann also an seine Endflächen *a* und *b* (Fig. 27, S. 32) Eisenstücke anhängen. Unterbricht man den Strom, etwa in der Weise, dass man das eine Drahtende aus der an der Polplatte befindlichen Klemmschraube herausnimmt, so verliert *ab* seinen Magnetismus. Ist *ab* aber ein Stahlstab, so bleibt nach der Stromunterbrechung ein Teil des Magnetismus, der durch den Strom erregt wurde, zurück — remanenter Magnetismus.

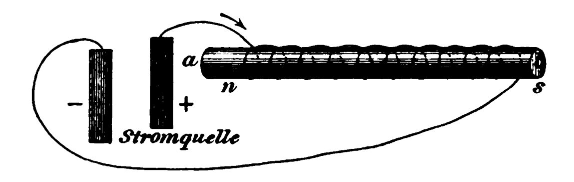


Fig. 27.

Einen Stab weichen Eisens, auf den ein isolierter Kupferdraht aufgewickelt ist, der also mit Hülfe eines elektrischen Stromes in einen Magnet verwandelt werden kann, nennen wir „Elektromagnet“. Man giebt den Elektromagneten, damit man ihre magnetische Kraft besser ausnutzen kann, meistens eine U-förmige Gestalt (Fig. 28). AB und CD sind die Schenkel des Elektromagnets.

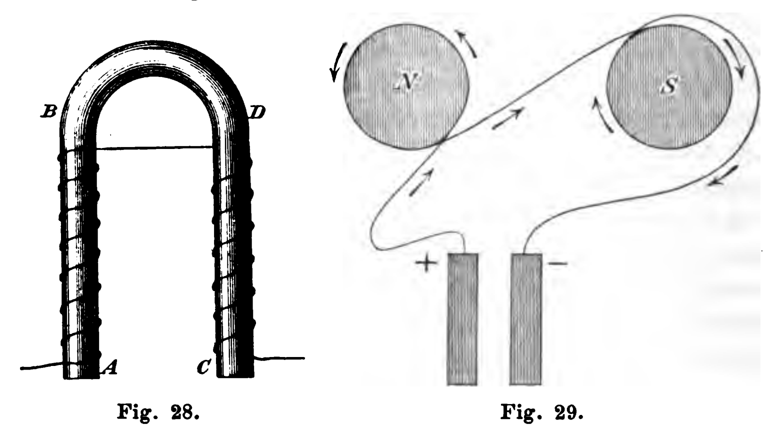


Fig. 28. Fig. 29.

Die vorstehende Skizze (Fig. 29) zeigt, wie der Draht aufgewickelt werden muss. (Wir sehen von den beiden Schenkeln nur die Endflächen, der Elektromagnet befindet sich also unter der Papierebene senkrecht zu derselben.) Die Pfeile geben die Stromrichtung an. Man sieht, dass der Strom den einen Schenkel von links nach rechts umkreist, also in dem Sinne, in dem sich der Zeiger einer Uhr bewegt, den andern von rechts nach links. Will man wissen, wo ein Elektromagnet seinen Nordpol und wo er seinen Südpol hat, so beachte man folgende Regel: Man halte den Elektromagnet so, dass die

Endflächen dem Beschauer zugewendet sind; dann ist dasjenige Ende der **Südpol**, das vom Strome umflossen wird in dem Sinne, in dem sich der Zeiger der Uhr dreht.

Die Stärke eines Elektromagnets hängt ab:

1) von der Beschaffenheit des Eisens (je weicher, um so stärker),
2) von der Stromstärke,
3) von der Anzahl der Drahtwindungen.

Bemerkt sei noch, dass die Elektromagnete eine verhältnismässig viel grössere Tragfähigkeit haben, als die gewöhnlichen Magnete.

Man nimmt an, dass in jedem Eisenstücke, auch wenn es unmagnetisch ist, jedes Molekül ein Magnet sei. Bei dem unmagnetischen Eisen liegen die Molekularmagnete bunt durcheinander, so dass eine magnetische Wirkung nach aussen nicht zustande kommt. Durch den elektrischen Strom werden nun die Molekularmagnete gedreht und so gerichtet, dass sie auf den Stromkreisen (den Windungen) senkrecht stehen und alle Nordpole nach der einen (Fig. 30), alle Südpole nach der anderen Seite zeigen. Die Moleküle des weichen Eisens setzen einer drehenden Kraft nur geringen, die Stahlmoleküle aber einen erheblichen Widerstand entgegen. Man nennt die Kraft, die die Moleküle einer Richtungsänderung entgegensetzen, **Koercitivkraft**.

Fig. 30.

Aus dem Gesagten ergiebt sich, dass weiches Eisen, da es eine geringe Koercitivkraft hat, leicht magnetisiert werden kann, dass es seinen Magnetismus aber auch leicht verliert, dass Stahl dagegen wegen der grossen Koercitivkraft schwieriger zu magnetisieren ist, dafür aber den Magnetismus länger beibehält.

14. Magnetoinduktion (Erzeugung elektrischer Ströme durch Magnete).

Wenn ein geschlossener Leiter, z. B. ein Drahtring, im magnetischen Felde so bewegt wird, dass die Anzahl der Kraftlinien, die durch seine Fläche hindurchgehen, bei der Bewegung zu- oder abnimmt, so entsteht in dem Leiter ein

elektrischer Strom. Bewegen wir also den Drahtkreis A_1 (Fig. 31) nach links bis A_2, so entsteht, weil während dieser Bewegung die Anzahl der Kraftlinien, die durch die Kreisfläche hindurchgehen, zunimmt, oder anders ausgedrückt, weil Kraftlinien geschnitten werden (von aussen nach innen), ein elektrischer Strom und ebenso, wenn wir den Ring zurückbewegen, weil dann die Anzahl der den Ring durchsetzenden Kraftlinien abnimmt (die Kraftlinien werden jetzt von innen nach aussen geschnitten).

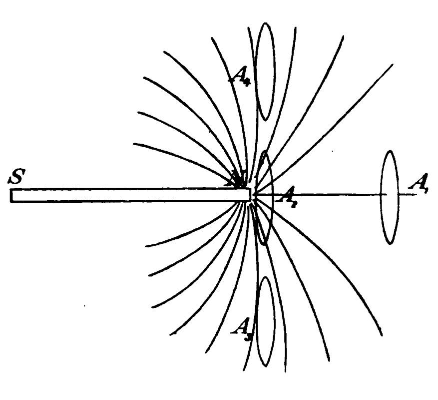


Fig. 31.

Man nennt die so erhaltenen Ströme **Induktionsströme** und sagt, der **Magnet induziere elektrische Ströme** (nur dann, wenn Kraftlinien geschnitten werden). Statt den Ring A_1 nach links zu bewegen, kann man auch den Magnet dem Ringe nähern.

Die **Richtung der induzierten Ströme** kann man jedesmal mit Hülfe der Maxwell'schen Regel **bestimmen**: „Schaut man durch den geschlossenen Leiter in der Richtung, nach welcher der Nordpol einer Magnetnadel zeigt, so entsteht ein Strom im Sinne des Uhrzeigers, wenn der Leiter so bewegt wird, dass sich die Anzahl der durchgehenden Kraftlinien vermindert; der Strom ist entgegengesetzt der Uhrzeigerbewegung, wenn sich die Anzahl der durchgehenden Kraftlinien vermehrt.“ Um also die Stromrichtung in dem Ringe A_1 während seiner Bewegung nach A_2 zu bestimmen, denken wir uns eine an einem Faden aufgehängte Magnetnadel in die Nähe des Nordpoles N gebracht. Der Nordpol der Nadel zeigt nach rechts. Wir müssen also von N aus nach A_1 hinsehen. Da sich nun die Anzahl der durchgehenden Kraftlinien vermehrt (während

der Bewegung), so fliesst der Strom in dem Ringe von oben nach links.

Bewegen wir den Ring nach rechts, so nimmt die Anzahl der durchgehenden Kraftlinien ab; der induzierte Strom fliesst also von oben nach rechts. Bewegen wir den Ring in einer vertikalen Ebene (senkrecht zu NS) aus der Lage A_4 nach A_2 und dann weiter in die Lage A_3, so nimmt zuerst die Anzahl der durchgehenden Kraftlinien zu (bis A_2) und dann ab, so dass sich die Stromrichtung einmal ändert. Dasselbe gilt, wenn wir den Ring aus der Lage A_3 in die Lage A_4 bringen. Bewegen wir also den Ring auf und ab, so erhalten wir Ströme, deren Richtung sich fortwährend ändert, d. h. Wechselströme.

Benützen wir statt eines Ringes ein Solenoid, so wird in jeder Windung ein Strom induziert; die in den einzelnen Windungen induzierten Ströme verstärken sich.

Die elektromotorische Kraft des induzierten Stromes hängt ab von der Anzahl der Kraftlinien, die in einer Sekunde von dem Leiter durchschnitten werden. Diese Anzahl aber hängt ab: 1) von der Geschwindigkeit, mit der der Leiter bewegt wird, 2) von der Anzahl der vorhandenen Kraftlinien, d. h. von der Stärke des magnetischen Feldes (von der Stärke des Poles), 3) von der Grösse des Drahtkreises oder von der Länge des Leiters.

Das Durchschneiden der Kraftlinien erfordert einen gewissen Arbeitsaufwand*). Als Aequivalent für diese Arbeit erhalten wir elektrische Energie. Die Magnetoinduktion giebt uns also ein Mittel an die Hand, mechanische Arbeit in Elektricität umzuwandeln.

Wenn wir die Kraftlinien von ihrem Wege ablenken und sammeln oder concentrieren, so werden bei einer gewissen Geschwindigkeit des Leiters in einer Sekunde mehr Kraftlinien geschnitten, als wenn die Kraftlinien ihren natürlichen Verlauf

---

*) Wir erinnern daran, dass ein Stromkreis sich gerade so verhält wie ein Magnet, der senkrecht zur Ebene des Stromkreises steht. Bewegt man A_1 (Fig. 31) nach N hin, so wird der Stromkreis von N abgestossen (der Nordpol des gedachten Magnets muss also nach links zeigen), und man muss die abstossende Kraft überwinden.

haben. Nun können wir eine Concentration der Kraftlinien dadurch erreichen, dass wir dem Magnetpole *N* (Fig. 31) gegenüber ein Stück weichen Eisens anbringen.

Um die Magnetoinduktion nachzuweisen, können wir folgende Versuche anstellen: Schiebt man in eine Drahtrolle, nachdem man die Drahtenden mit einem Galvanoskop *G* verbunden hat (dasselbe ist in der Fig. 32 durch einen Kreis dargestellt), einen Magnetstab hinein, so beobachtet man, falls das Galvanometer empfindlich genug ist, einen Ausschlag der Nadel. Selbstverständlich muss das Galvanometer so weit von der Drahtrolle entfernt sein, dass der Magnet nicht direkt auf die Nadel einwirkt. Der Ausschlag der Nadel zeigt aber, wie wir gesehen haben, an, dass ein Strom durch die Windungen fliesst. Zieht man den Magnetstab aus der Rolle heraus, so erfolgt abermals ein Ausschlag, aber dieses Mal nach der entgegengesetzten Seite wie eben (zuerst etwa nach links*), das andere Mal nach rechts). Statt einer Drahtrolle benutzt man besser eine Spule, auf die ein langer Draht aufgewickelt ist (Fig. 33).

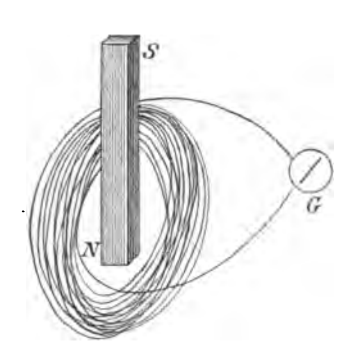


Fig. 32.

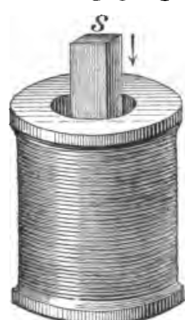


Fig. 33.

Man kann den Versuch in der Weise abändern, dass man einen Magnetstab in die Spule hineinstellt und dessen Magnetismus zuerst schwächt und dann wieder bis zur vollen Stärke anwachsen lässt, oder dass man einen Eisenstab, der sich in der Spule befindet, magnetisiert und entmagnetisiert (die Anzahl der Kraftlinien vermehrt resp. vermindert).

---

*) Wir meinen die Bewegung, die der Nordpol der Galvanoskopnadel ausführt, auch im Folgenden.

15. Stöhrer's Magnetoinduktionsmaschine (Wechselströme — Gleichströme).

Die erste Maschine, in der elektrische Ströme durch Magnetoinduktion erzeugt wurden, konstruierte Pixii (1832). Der Apparat Pixii's wurde verbessert von Stöhrer, dessen Maschine etwas schematisiert in Fig. 34 dargestellt ist: *M* sei ein horizontal liegender permanenter Magnet (Stahlmagnet) mit den Polen *N* und *S*. Die Achse *A A'* ruht mit ihrem zugespitzten Ende *A* in einer Vertiefung in *M*, an ihrem unteren Ende ist die Kurbel *K* befestigt. Mit der Achse fest verbunden ist eine Stahlplatte, auf der die beiden Induktionsspiralen *D* und *D'* stehen, in deren Hohlräumen sich weiche Eisencylinder befinden*). Ferner sieht man auf *A A'* zwei ringförmige Metallwülste *W* und *W'*, die durch isolierende Kautschukringe von der Achse getrennt sind. Den Querschnitt durch einen Wulst und die Achse zeigt Fig. 35, in der die schraffierten Teile der Achse und dem Wulste, der weiss gelassene Teil dem isolierenden Ringe entsprechen. Auf dem einen Schenkel des Magnets sind die Federn *F* und *F'* festgeschraubt, deren freie Enden auf *W* und *W'* aufliegen und, wenn die Achse gedreht wird,

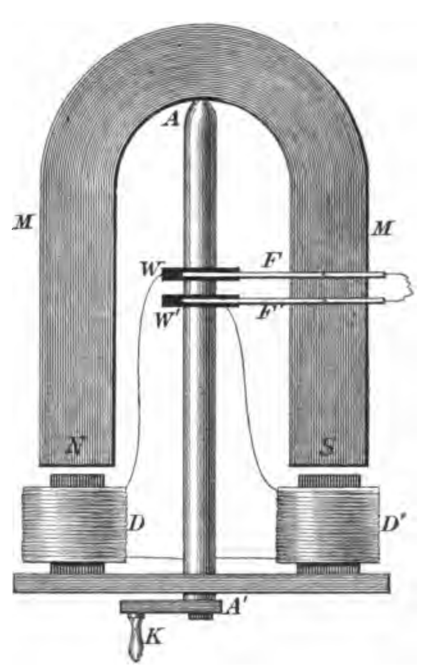
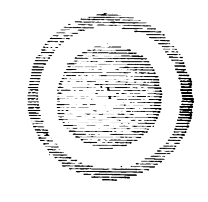


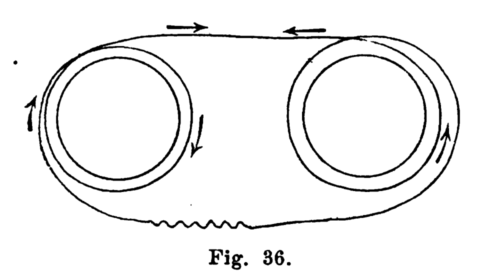
Fig. 34.


Fig. 35.

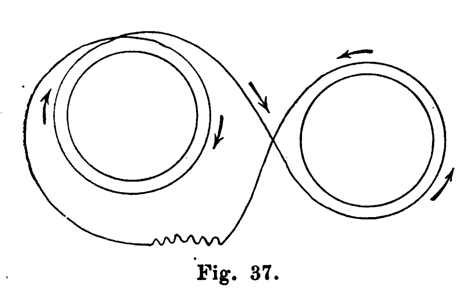
*) Welchen Zweck die Eisenkerne haben, ist im vorigen Abschnitte auseinandergesetzt worden.

auf den Wülsten schleifen. Wir nennen den Eisenkern mit den Spulen **Anker** oder **Induktor**. Wird die Kurbel gedreht, so schneidet jede einzelne Windung Kraftlinien. Daher wird in jeder Windung ein Strom induziert. Die in den Windungen *D* induzierten Ströme addieren sich, ebenso verstärken sich die in den Windungen *D'* erregten Stromimpulse. Dagegen haben die in den Windungen *D* erzeugten Ströme nach der Maxwell'schen Regel entgegengesetzte Richtung wie die in *D'* induzierten Ströme.

Wäre nun der Draht auf den beiden Spulen in demselben Sinne aufgewickelt, etwa so, wie es Fig. 36 zeigt, so würden zwei Ströme entgegengesetzter Richtung in dem Drahte gleichsam gegeneinander prallen. Zwei Ströme aber, die entgegengesetzte Richtung haben und sich in einem Leiter begegnen, schwächen sich gegenseitig und heben sich ganz auf, wenn sie gleich stark sind.


Fig. 36.

Kehren wir aber die Windungen der einen Spule um, wickeln wir also den Draht so auf wie bei einem Elektromagnet (vgl. Fig. 29), so erhalten die beiden Ströme dieselbe Richtung — sie verstärken sich, wie man aus der Fig. 37 erkennt.


Fig. 37.

Die Stromimpulse werden um so schwächer, je mehr sich die Spulen von den Polen entfernen und sind gleich Null, d. h. die Spulen sind stromlos, wenn wir die Kurbel um 90° gedreht haben, so dass sie also senkrecht zur Papierebene steht. Drehen wir die Kurbel weiter nach rechts, so wächst die elektromotorische Kraft und zwar so lange, bis *D* und *D'* ihre

Plätze gewechselt haben. Von jetzt an wird die Stromrichtung in jeder Spule eine andere; denn D entfernt sich von einem Südpole und D' von einem Nordpole (Maxwell'sche Regel). Es entstehen also in jeder Spule bei jeder Umdrehung zwei Ströme, deren Stärke schwankt und deren Richtung sich nach jeder halben Umdrehung ändert. Unser magnetelektrischer Apparat liefert daher Wechselströme, wir können ihn eine Wechselstrommaschine nennen. Sorgt man aber durch eine an dem Apparate angebrachte Vorrichtung, durch einen Stromwender oder Commutator, dafür, dass alle Ströme dieselbe Richtung erhalten, so erzeugt derselbe Gleichströme und wird dann eine Gleichstrommaschine.

Die freien Enden des Drahtes sind, wie man aus der Fig. 34 ersieht, mit den Wülsten W und W' fest verbunden, so dass die induzierten Ströme nach W oder W' fliessen. Da bei der Rotation der Achse die Federn F und F' auf den Wülsten schleifen, also mit ihnen stets Contakt haben, so fliessen die Ströme durch die Federn — man sieht jetzt ein, welchen Zweck die isolierenden Kautschukscheiben haben — und können von dort durch die äussere Leitung, die Zickzacklinie, geschickt werden.

Bei der beschriebenen magneto-elektrischen Maschine wird mechanische Arbeit in Elektricität umgesetzt. Nehmen wir nämlich an, dass bei 100 Touren, wenn M nicht magnetisch ist, die Arbeit, die zur Überwindung der Reibung erforderlich ist, a mkg sei, dann ist sie, wenn M magnetisch ist, nicht mehr a mkg, sondern etwa a' mkg, und zwar ist a' grösser als a. Die Arbeitsdifferenz $a'-a$ wird in Elektricität umgewandelt.

Viertes Kapitel.

Leitungswiderstand — Rheostate.

16. Leitungswiderstand.

Fliesst Wasser durch eine Röhre, so findet zwischen dem Wasser und der Röhrenwand Reibung statt; infolge der Reibung wird die Bewegung des Wassers verlangsamt. Die Röhre setzt also gleichsam dem Durchgang des Wassers Widerstand entgegen. Dieser Widerstand ist abhängig von der lichten Weite der Röhre, der Länge der Röhre und dem Material, aus dem die Röhre angefertigt ist.

Ähnlich verhält es sich beim elektrischen Strome. Fliesst ein elektrischer Strom durch einen Leiter, so wird derselbe erwärmt. Die Wärme ist aber, wie wir gesehen haben, eine Energieform, wenn aber eine Energieform entsteht, muss eine andere Energieform eine Einbusse erleiden. Da hier nur die elektrische Energie in Betracht kommen kann, so wird in jedem Leiter Elektricität in Wärme umgesetzt, also elektrische Energie verbraucht, d. h. der Strom wird geschwächt. Man sagt nun, indem man an analoge Vorgänge bei der Bewegung der Flüssigkeiten denkt: „Der Strom findet in jedem Leiter Widerstand“ und spricht vom „Leitungswiderstande“.

Zunächst hängt bei derselben Drahtsorte der Leitungswiderstand von der Länge des Drahtes ab, und zwar gilt das Gesetz: „In demselben Masse, in dem die Länge zunimmt, nimmt auch der Leitungswiderstand zu“ oder in der Sprache der Mathematik: „der Leitungswiderstand ist proportional der Länge des Leiters“.

Der Leitungswiderstand hängt aber auch von der Dicke des Drahtes oder, allgemeiner gesagt, von dem Querschnitte des Leiters ab. Um zu ermitteln, wie der Leitungswiderstand von der Grösse des Querschnittes abhängt, benutzen wir zwei Drähte aus demselben Metalle, aber von verschiedener Dicke. Nehmen wir an, die eine Drahtsorte habe einen zweimal so

grossen Querschnitt wie die andere. Wir verbinden nun je 1 m des dünneren Drahtes mit einem galvanischen Elemente und einem Ampèremeter (Fig. 38) und merken uns den Ausschlag der Nadel. Dann schalten wir den dünneren Draht aus und so lange von dem dickeren Drahte ein, bis wir wieder dieselbe Ablenkung wie eben erhalten. Wir finden, dass wir 2×2 m von dem zweiten Drahte einschalten müssen. Also ist der Leitungswiderstand des Drahtes mit dem doppelten Querschnitte zweimal so klein wie der des Drahtes mit dem einfachen Querschnitte, verallgemeinert: „In demselben Verhältnisse, in dem der Querschnitt eines Leiters abnimmt, nimmt der Leitungswiderstand zu“ oder: „der Leitungswiderstand ist umgekehrt proportional dem Querschnitte“.

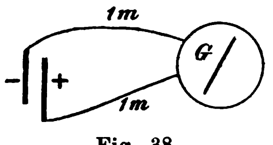


Fig. 38.

Anmerkung: Wie man den Querschnitt eines Drahtes bestimmen kann, mag das folgende Beispiel lehren: Es handele sich um einen Kupferdraht. Man messe ein beliebiges, aber nicht zu kurzes Stück desselben. Seine Länge sei 5 m oder 500 cm. Mit Hülfe einer guten Wage bestimme man das Gewicht des gemessenen Drahtstückes; dieses sei 45 g. Das specifische Gewicht des Kupfers ist 8,8. Den Querschnitt q in qcm erhält man dann aus der Gleichung:

$$q \cdot 500 \cdot 8{,}8 = 45. \quad q = \frac{45}{500 \cdot 8{,}8}\,\text{qcm} = 0{,}0102\,\text{qcm} = 1{,}02\,\text{qmm}.$$

Der Leitungswiderstand ist ferner abhängig von dem Stoffe, aus dem der Leiter hergestellt ist; der Leitungswiderstand eines Kupferdrahtes z. B. ist nicht derselbe, wie der eines gerade so langen und dicken Eisendrahtes.

Da die Stromstärke von der Grösse des Leitungswiderstandes abhängig ist, so ist die Ausmessung oder die Berechnung des Widerstandes, den ein elektrischer Strom in einem gegebenen Leiter zu überwinden hat, von grosser Wichtigkeit.

Was heisst nun messen? Messen heisst nichts anderes als vergleichen. Eine gerade Linie ausmessen heisst: die Länge der Linie mit der Länge einer bekannten Linie, der Linieneinheit,

vergleichen. Die Längeneinheit kann beliebig gewählt werden; wir bedienen uns des Meters oder Centimeters. Wenn wir also sagen: „Eine Gerade AB ist 8 m lang“, so ist damit gemeint: „AB ist 8mal so lang wie die bekannte, festgelegte Linieneinheit, nämlich das Meter“. — Wollen wir nun Leitungswiderstände messen, so müssen wir eine Widerstandseinheit wählen. Als Einheit des Leitungswiderstandes benutzte man früher ausschliesslich die Siemens'sche Einheit. Unter einer Siemens'schen Einheit (S. E.) versteht man den Widerstand, den der elektrische Strom zu überwinden hat, wenn er durch eine Quecksilbersäule von 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt fliesst (Fig. 39). Jetzt misst man Widerstände nach einer anderen, aus theoretischen Betrachtungen abgeleiteten Einheit, nämlich dem Ohm (Ω). Vergleicht man die Siemens'sche Einheit mit dem Ohm, so findet man, dass ein Ohm gleich ist 1,06 S. E. ($1\ \Omega = 1{,}06$ S. E.). Will man also von S. E. zu Ohm übergehen, so hat man mit 100 zu multiplizieren und durch 106 zu dividieren. (Siehe auch S. 43.)

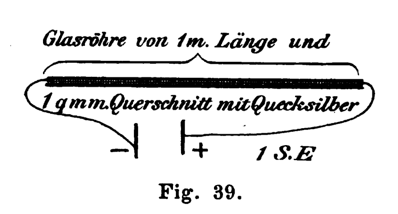


Fig. 39.

Unter dem specifischen Leitungswiderstande eines Körpers versteht man die Zahl, die angiebt, wie vielmal der Leitungswiderstand des betreffenden Körpers grösser ist als derjenige einer Quecksilbersäule von denselben Dimensionen (derselben Länge und demselben Querschnitte). Der specifische Leitungswiderstand des Kupfers ist 0,016, d. h. der Widerstand, den der Strom in einem Kupferdrahte von 1,06 m Länge und 1 qmm Querschnitt findet, ist gleich 0,016 Ω. In 1060 m desselben Drahtes ist der Widerstand also gleich 16 Ω.

Je grösser der Leitungswiderstand eines Körpers ist, um so geringer ist das Vermögen desselben, den elektrischen Strom zu leiten, oder um so kleiner ist seine Leitungsfähigkeit. Man nennt den Bruch $\frac{1}{\text{Specif. Leitungswiderstand}}$ das speci-

fische Leitungsvermögen. Dasselbe ist nach einer Tabelle von Kohlrausch

für Quecksilber: 1,
„ Silber : 59,
„ Kupfer : 55,
„ Eisen : 6—10 (je nach der Natur des Eisens),
„ Neusilber : 2,4—6.

Kupfer leitet also den elektrischen Strom 55mal so gut wie Quecksilber und $5^1/_2$- bis 9mal so gut wie Eisen. Ein Kupferdraht aber von $^1/_{10}$ qmm Querschnitt und 1 m Länge setzt dem Durchgang der Elektricität einen grösseren Widerstand entgegen als ein Eisendraht von 1 qmm Querschnitt und 1 m Länge. Wegen des kleinen specifischen Leitungswiderstandes benutzt man bei elektrischen Anlagen mit Vorliebe Kupferdrähte.

Will man den Widerstand eines Leiters in Ohm haben, so kann man die folgende Tabelle benutzen:

Widerstand eines Drahtes von 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt

Eisen $\frac{1}{12}\ \Omega$,

Kupfer $\frac{1}{52}\ \Omega$ (die Techniker benutzen meist die Zahl $\frac{1}{50}$),

Neusilber $\frac{1}{4}\ \Omega$,

Nickelin $\frac{1}{3}\ \Omega$.

Wegen des grossen Leitungswiderstandes benutzt man bei Vorschaltwiderständen (Rheostaten) vielfach Neusilber und Nickelin.

Die Flüssigkeiten sind sehr schlechte Stromleiter. Reines Wasser leitet den Strom sozusagen gar nicht. Das Leitungsvermögen des Wassers wird aber durch Zusatz von Säuren, besonders von Schwefelsäure, oder Salzen wesentlich erhöht.

Verdünnte Schwefelsäure leitet den Strom am besten, wenn sie das specifische Gewicht 1,22 hat (30,4 Prozent).

Das specifische Leitungsvermögen einer solchen Mischung ist $\frac{6914}{100\,000\,000}$.

Das Leitungsvermögen ändert sich mit der Temperatur; dasselbe wird bei den Metallen kleiner, bei verdünnten Säuren und Salzlösungen grösser, wenn die Temperatur steigt.

Bei den galvanischen Elementen ist die elektromotorische Kraft unabhängig von der Grösse der Polplatten. Da aber der Strom durch das Element hindurchfliesst, so ist es nicht gleichgültig, ob man Polplatten mit kleiner oder mit grosser Oberfläche nimmt. Sind nämlich *abcd* und *efgh* (Fig. 40) die gleich grossen Polpatten einer galvanischen Kette, so fliesst der Strom durch die Flüssigkeitsschicht *abcd efgh*, deren Querschnitt (dieser muss auf der Stromrichtung senkrecht stehen) gleich *abcd* ist. Je grösser also die Polplatten sind, um so kleiner ist der Leitungswiderstand in dem Elemente. Wir sehen jetzt, worin der Nutzen beruht, wenn man Pole mit grosser Oberfläche wählt.

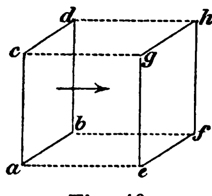


Fig. 40.

Wir wollen durch ein einfaches Beispiel erläutern, wie man den Leitungswiderstand eines Schliessungsbogens berechnen kann: Bei einer elektrischen Anlage werden 200 m Kupferdraht von 0,5 qmm Querschnitt benutzt; wie gross ist der Leitungswiderstand? — Wäre der Querschnitt des Drahtes 1 qmm und seine Länge 1 m, so wäre der Widerstand $\frac{1}{50}\ \Omega$. Da der Querschnitt aber 0,5 qmm, also halb so gross wie 1 qmm ist, so ist bei einer Länge von 1 m der Widerstand $\frac{2}{50}\ \Omega$. In einem Drahte von 200 m Länge ist demnach der Widerstand gleich $\frac{200 \cdot 2}{50}\ \Omega = 8\ \Omega$.

17. Rheostate.

Rheostate sind Vorrichtungen, mit deren Hülfe man den Leitungswiderstand eines Stromleiters experimentell bestimmen

kann. Eine der verbreitetsten Formen ist der Siemens'sche Stöpselrheostat (Fig. 41). Derselbe besteht aus einem Kasten, auf dessen aus einer isolierenden Masse (z. B. Hartgummi) hergestelltem Deckel dicke, durch kleine Zwischenräume von einander getrennte Metallplatten *a*, *b*, *c*... befestigt

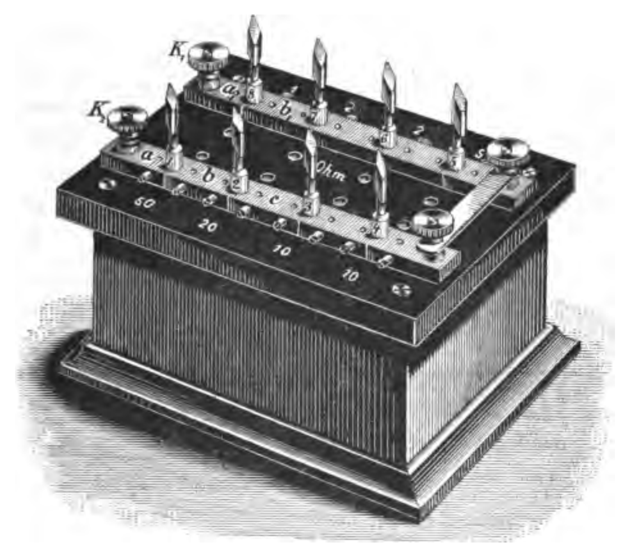


Fig. 41.

sind. Die Platten haben bogenförmige Ausschnitte, in die konische Messingstöpsel mit Reibung eingesetzt werden können. Die letzte Platte der hinteren Reihe ist, wie man sieht, mit der letzten Platte der vorderen Reihe durch einen breiten Metallstreifen leitend verbunden. K_1 und K_2 sind Klemmschrauben zur Befestigung von Drähten. Im Innern des Kastens befinden sich Spiralen aus Neusilberdraht. Die Enden der Drähte sind mit den Platten so verbunden, wie es die Fig. 42 veranschaulicht. Der Widerstand einer jeden Spirale ist genau bestimmt und auf dem Deckel angeschrieben. Bei dem abgebildeten Apparate betragen die Widerstände 1, 2, 2, 5, 10 etc. Ohm.

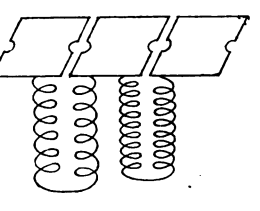


Fig. 42.

Sind nun sämtliche Stöpsel fest eingesetzt, und verbindet man K_1 und K_2 mit den Polen einer Stromquelle, so fliesst der Strom, weil der Widerstand in den dicken Platten verschwindend klein ist, durch keine Drahtspirale (siehe „Stromverzweigung"). Entfernt man aber einen Stöpsel, z. B. den mit 8 bezeichneten, so ist der Strom gezwungen, durch die a_1 und b_1 verbindende Spirale zu fliessen; es ist also ein Widerstand von 1 Ω eingeschaltet. Will man einen Leitungswiderstand von 3 Ω einschalten, so muss man die Stöpsel 8 und 7 herausziehen. Sind alle Stöpsel entfernt, so ist der ganze eingeschaltete Widerstand gleich $1 + 2 + 2 + 5 + 10 + 10 + 20 + 50\,\Omega = 100\,\Omega$.

Um nun mit Hülfe eines Rheostaten den Widerstand in irgend einem Leiter, z. B. einer elektrischen Klingel, zu messen, schaltet man zunächst die Klingel nebst einem Galvanometer vermittelst kurzer, dicker Drähte in den Schliessungskreis eines galvanischen Elementes oder einer Batterie ein und merkt sich die Ablenkung der Nadel. Dann bringt man an Stelle der Klingel den Rheostaten in den Schliessungskreis und schaltet durch Entfernen der betreffenden Stöpsel eine Spirale nach der anderen in den Stromkreis ein, bis man wieder denselben Ausschlag der Nadel wie vorher erhält (siehe auch S. 52).

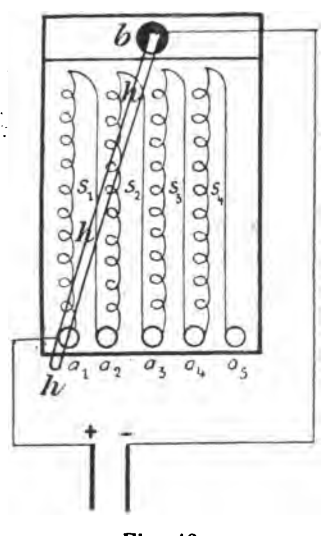


Fig. 43.

Kurbelrheostate (Regulierwiderstände). Bei den meisten Versuchen über den elektrischen Strom muss die Stromstärke eine vorgeschriebene Grösse haben. Da nun, wie wir später sehen werden, die Stromstärke abhängig ist von dem Widerstand des ganzen Stromkreises, so kann man die Stärke einer Stromquelle dadurch regulieren, dass man einen leicht veränderlichen

Widerstand einschaltet. Ein solcher ist in Fig. 43 abgebildet (schematisch). *h* ist ein um *b* drehbarer Metallhebel, s_1, s_2 etc. sind Spiralen aus Neusilberdraht, *a* endlich sind Kontaktstücke. Liegt *h* auf a_1, so ist keine Spirale in den Stromkreis eingeschaltet. Dreht man *h*, bis er mit a_2 Kontakt hat, so fliesst der Strom durch die Spirale s_1.

Fünftes Kapitel.

Gesetze des galvanischen Stromes.

---

18. Das Ohm'sche Gesetz

bildet den Ausgangspunkt aller Berechnungen, die sich auf den elektrischen Strom beziehen, und ist deshalb sowohl für den Theoretiker als auch für den Praktiker von der grössten Bedeutung. Das genannte Gesetz kann man kurz so formulieren:

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{elektromotorische Kraft}}{\text{Widerstand}}$$

Der Widerstand, den der Strom eines geschlossenen galvanischen Elementes oder einer Batterie zu überwinden hat, besteht aus zwei Summanden, nämlich dem Widerstande in dem Elemente (Batterie) selbst und demjenigen im Schliessungsbogen. Ersteren nennt man den inneren oder wesentlichen, letzteren den äusseren Widerstand. Bezeichnen wir die Stromstärke mit J, die elektromotorische Kraft (Potentialdifferenz) mit E, den wesentlichen Widerstand mit W, den äusseren mit r, so ist

$$J = \frac{E}{W + r}.$$

Diese Gleichung können wir benutzen, um folgende sehr wichtige Frage zu entscheiden: Wie müssen wir mehrere zur Verfügung stehende Elemente zu einer Batterie verbinden, wenn wir eine möglichst grosse Stromstärke erhalten wollen?

Eine gegebene Anzahl von Elementen kann man auf verschiedene Weisen zu einer Batterie vereinigen. Beispiel: Es stehen 4 Elemente zur Verfügung: Man kann zunächst die Elemente hintereinander schalten, d. h. den positiven Pol des ersten Elementes mit dem negativen Pole des zweiten etc. verbinden, wie es in der Fig. 44 schematisch dargestellt

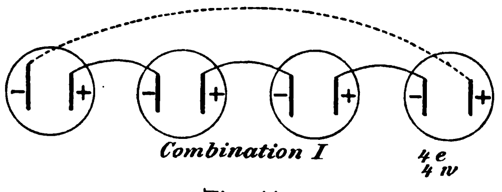


Fig. 44.

ist. (Die punktierte Linie ist der Schliessungsbogen.) Wir können aber auch die Elemente so schalten, wie es die Figuren 45 und 46 zeigen. Bei der Kombination II sind die

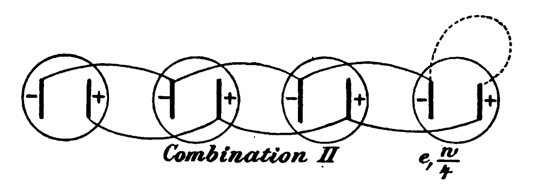


Fig. 45.

vier positiven Pole mit einander verbunden und ebenso die negativen: die Elemente sind nebeneinander oder parallel geschaltet; bei III sind je zwei Elemente durch Nebeneinanderschaltung zu einem Doppelelement verbunden und die Doppelelemente hintereinander geschaltet. Bei der Kombination I ist die elektromotorische Kraft viermal so gross wie bei einem Elemente; da aber der Strom die vier Elemente nach einander durchfliessen muss, so

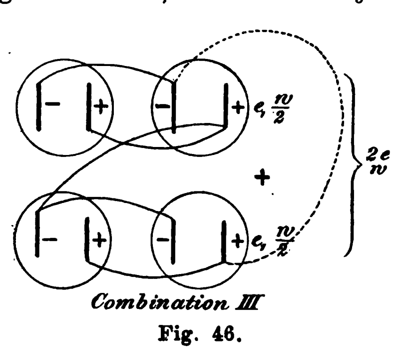


Fig. 46.

ist auch der innere Widerstand viermal so gross wie in einem Elemente. Die Kombination II entspricht offenbar einem Elemente, bei dem die Polplatten viermal so gross sind wie bei einem der gegebenen galvanischen Elemente. Da aber der innere Widerstand von der Grösse der Polplatten abhängt, so beträgt bei II der innere Widerstand nur den vierten Teil des Widerstandes, den der Strom in einem einfachen Elemente zu überwinden hat. Bei III ist die elektromotorische Kraft doppelt so gross wie bei einem Elemente; der innere Widerstand eines Doppelelementes ist halb so gross, der gesamte innere Widerstand aber gerade so gross wie der eines Elementes. Man wird jetzt die bei den drei Kombinationen notierten Zahlen verstehen.

Wir wollen hier einige Bemerkungen über das Parallelschalten und Hintereinanderschalten von Stromquellen, deren innerer Widerstand im Vergleich zum äusseren klein ist, einschieben. Nehmen wir an, eine Pumpe *P* (Fig. 15 S. 19) hebe in jeder Sekunde 1 l Wasser 10 m hoch. Es kann dann durch eine von dem Reservoir ausgehende, vertikale Röhre in jeder Sekunde 1 l Wasser 10 m tief fallen, so dass die Arbeitsleistung unserer kleinen Wasserkraft 10 mkg pro Sekunde beträgt. Wollen wir nun den Effekt verdoppeln dadurch, dass wir noch eine zweite Pumpe arbeiten lassen, so können wir dies in zweifacher Weise erreichen. Wir können es so einrichten, wie man aus der Fig. 47 (S. 50) erkennt, d. h. das Gefälle verdoppeln; wir können aber auch eine zweite Pumpe neben der ersten aufstellen, so dass beide Pumpen Wasser in dasselbe Reservoir heben, d. h. die Stromstärke verdoppeln. Dem ersten Falle entspricht die Hintereinanderschaltung der Stromquellen, dem zweiten die Parallelschaltung.

Wir behandeln zunächst die beiden extremen Fälle: 1) der äussere Widerstand r sei viel grösser als der gesamte innere Widerstand (lange Telegraphenleitung), 2) der äussere Widerstand r sei klein im Vergleich zum wesentlichen eines Elementes. Nennen wir den inneren Widerstand in einem Elemente w, die elektromotorische Kraft e, so ist für

I $E = 4 \cdot e$, $W = 4\,w$ und $J = \frac{4\,e}{4\,w + r}$.

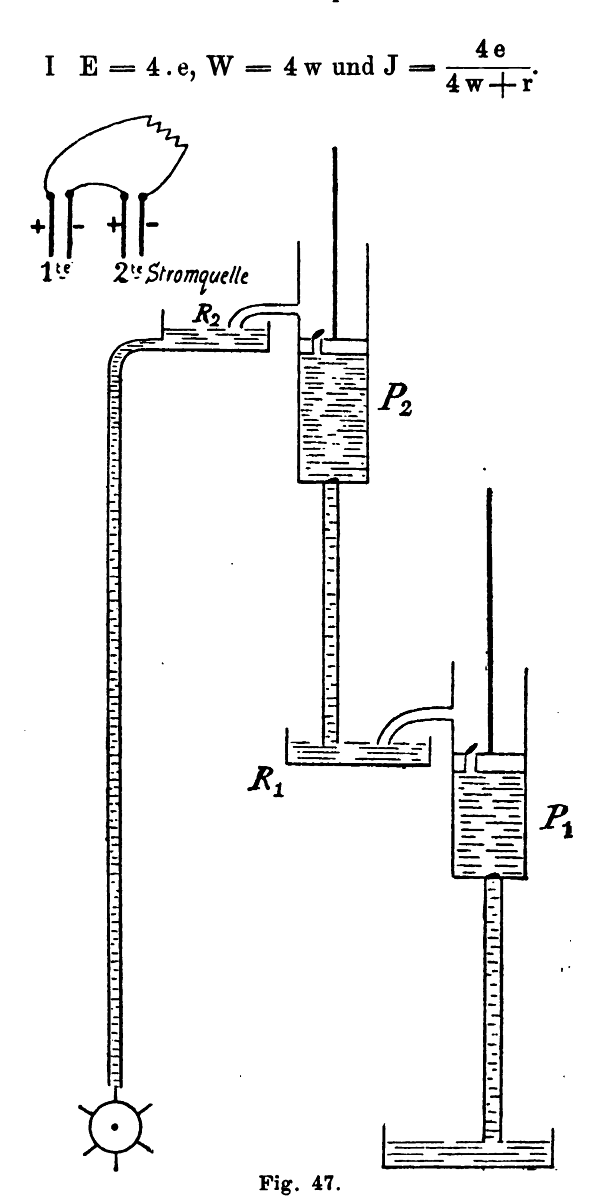


Fig. 47.

1) Ist r sehr gross, so spielt der Summand 4 w im Nenner nur eine untergeordnete Rolle, und es ist angenähert

$J = \frac{4e}{r}$. Für ein Element ist:

$J_1 = \frac{e}{w + r}$ oder fast gleich $\frac{e}{r}$. Folglich $J = 4 . J_1$.

Für II ist: $J = \frac{e}{\frac{w}{4} + r} = \frac{e}{r} = J_1$.

Ist also der äussere Widerstand sehr gross (im Vergleich zum inneren), so schaltet man die Elemente hintereinander.

2) Wenn r im Vergleich zu w klein ist, so erhalten wir ein ungefähr richtiges Resultat, wenn wir r vernachlässigen. Dann ist

für ein Element: $J_1 = \frac{e}{w + r} = \frac{e}{w}$,

„ die Kombination I: $J = \frac{4e}{4w + r} = \frac{4e}{4w} = \frac{e}{w} = J_1$,

„ „ „ II: $J = \frac{e}{\frac{w}{4} + r} = \frac{e}{\frac{w}{4}} = 4 . \frac{e}{w} = 4 J_1$.

Ist der äussere Widerstand klein im Vergleich zum inneren eines Elementes, so sind die Elemente nebeneinander (parallel) zu schalten.

Ein Element mit grossen Polplatten kann demnach einen stärkeren Strom entsenden als viele hintereinander geschaltete Ketten.

Zahlenbeispiel: Es sei $r = 30\,\Omega$, $w = 0{,}6\,\Omega$: Dann ist für ein Element $J_1 = \frac{e}{30 + 0{,}6} = 0{,}0327\,e$ und für 4 hintereinander geschaltete Elemente $J = \frac{4 . e}{30 + 4 . 0{,}6} = \frac{4e}{32{,}4} = 0{,}123\,e$ also fast gleich $4 . J_1$.

Trifft keiner der beiden behandelten Fälle zu, so gilt für die Schaltung der Satz, der, weil seine Ableitung aus dem Ohm'schen Gesetze uns zu weit führen würde, ohne Beweis mitgeteilt werden mag: „Man erhält den stärksten Strom von einer Anzahl galvanischer Elemente, wenn man sie so ordnet,

dass der wesentliche Widerstand in der Batterie gleich dem Widerstand im Schliessungsbogen ist". Kann man die Elemente überhaupt nicht so schalten, dass der äussere Widerstand dem inneren gleich wird, so wählt man diejenige Kombination, bei der der äussere Widerstand dem inneren am nächsten kommt.

Zahlenbeispiel: $r = 2\,\Omega$, $w = 0{,}5\,\Omega$, $n = 4$.

Für ein Element ist: $J_1 = \frac{e}{0{,}5 + 2} = \frac{e}{2{,}5} = 0{,}4\,e.$

„ die Kombination I ist: $J = \frac{4\,e}{4 \,.\, 0{,}5 + 2} = 1 \,.\, e = 2^1/_2\,J_1.$

„ „ „ II ist: $J = \frac{e}{\frac{0{,}5}{4} + 2} = \frac{e}{2{,}125} = 0{,}47\,e$ (fast gleich J_1).

„ „ „ III „ : $J = \frac{2\,e}{2 \,.\, \frac{0{,}5}{2} + 2} = \frac{2}{2{,}5}\,e = 0{,}8\,e = 2\,J_1.$

Wie man sieht, ist die Kombination I die günstigste; bei dieser ist aber der innere Widerstand gleich $4 \,.\, 0{,}5\,\Omega = 2\,\Omega$ oder gleich r.

Da man bei allen Messungen und Berechnungen, die sich auf den elektrischen Strom beziehen, den inneren Widerstand der Stromquelle kennen muss, so wollen wir kurz auseinandersetzen, wie man denselben findet.

I. Man kennt oder kann messen (siehe Voltmeter S. 61) die elektromotorische Kraft.

1) Man darf Kurzschluss herstellen, d. h. die Pole der Stromquelle durch kurze, dicke Drähte mit dem Ampèremeter (s. S. 59) verbinden (bei Akkumulatoren vermeidet man Kurzschluss). Da in diesem Falle der äussere Widerstand verschwindend klein ist, so kann man ihn vernachlässigen, so dass der ganze Widerstand gleich dem inneren ist. Ist nun die am Ampèremeter abgelesene Stromstärke i Ampère, so ist nach dem Ohm'schen Gesetze

$$i = \frac{e}{w}, \text{ mithin } w = \frac{e}{i}.$$

2) Darf man keinen Kurzschluss bilden, so schaltet man ausser dem Ampèremeter einen bekannten Widerstand ein. Beträgt dieser Widerstand r Ohm, und ist die abgelesene Stromstärke i Ampère, so findet man w, den inneren Widerstand, aus der Gleichung

$$i = \frac{e}{w + r}.$$

II. Kennen wir die elektromotorische Kraft der Stromquelle nicht, so müssen wir, falls uns nur ein Ampèremeter zur Verfügung steht, zweimal die Stromstärke bei verschiedenem, aber bekanntem Widerstande messen.

Beispiel: Angenommen der Widerstand sei

bei der ersten Messung 0,5 Ω, die Stromstärke 2,5 Ampère,
„ „ zweiten „ 1 „ „ „ 1,5 „ ;

dann ist

$$2{,}5 = \frac{e}{w + 0{,}5} \text{ und } 1{,}5 = \frac{e}{w + 1}.$$

Durch Division der beiden Gleichungen erhält man

$$\frac{2{,}5}{1{,}5} = \frac{w + 1}{w + 0{,}5} \text{ oder } 25\,w + 12{,}5 = 15\,w + 15.$$

Mithin $10\,w = 2{,}5$; $w = 0{,}25\,\Omega$.

19. Spannungsverlust (Potentialgefälle).

Angenommen die Potentialdifferenz an den Polen einer Stromquelle (Klemmspannung) betrage 60 Volt und die Pole seien durch einen dünnen, kreisförmigen Draht (Fig. 48) mit einander verbunden. Die Spannung sinkt nun in dem Drahte von + 30 Volt bis zu — 30 Volt. (Die Elektricität würde nicht fliessen können, wenn an zwei Punkten des Drahtes dieselbe Spannung herrschte.) Teilen wir den Draht in 6 gleiche Teile, und hat der Draht überall denselben Querschnitt, so sinkt in jedem Teile

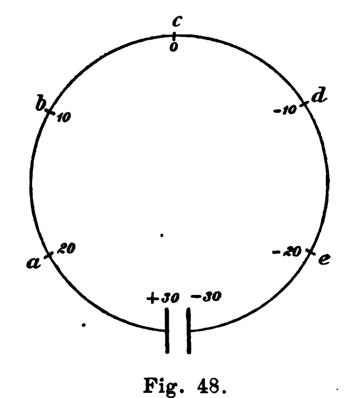


Fig. 48.

die Spannung um 10 Volt. In *a* ist die Spannung 20 Volt etc., in der Mitte des Drahtes ist sie 0 Volt. Man kann nun jedes Stück des Drahtes, z. B. *a b*, als ein galvanisches Element ansehen. Denn an den Punkten *a* und *b* herrschen verschiedene Spannungen, die Spannungsdifferenz wird aufrecht erhalten (durch die elektromotorische Kraft der Stromquelle), und die Punkte sind durch einen Draht (durch *a b* selbst) mit einander verbunden. Die Punkte *a* und *b* entsprechen also den Polen einer Stromquelle. Man kann daher auf jedes Stück des Drahtes das Ohm'sche Gesetz anwenden. Es ist also

$$\text{die Stromstärke in } ab = \frac{\text{Spannungsdifferenz zwischen } a \text{ und } b}{\text{Widerstand von } ab}.$$

Ersetzen wir das Wort Spannungsdifferenz durch das Wort Spannungsabnahme oder Spannungsverlust, so folgt, dass

der Spannungsverlust in einem Drahte = der Stromstärke × dem Widerstande des Drahtes.

Denken wir uns nun, eine Glühlampe, deren Widerstand 118 Ohm beträgt, sei durch zwei Drähte von je 1 Ohm Widerstand mit den Polen der Stromquelle verbunden. Es ist dann, wenn wir von dem inneren Widerstande der Stromquelle absehen, die Stromstärke $\frac{60}{120}$ Ampère $= \frac{1}{2}$ Ampère. Der Spannungsverlust in jedem der beiden Drähte beträgt also nach der obigen Gleichung $1 . \frac{1}{2}$ Volt, so dass an den Ösen der Lampe oder an ihren Zuleitungsdrähten die Spannungsdifferenz 59 Volt beträgt. (In unserem Beispiele würde der Verlust in der Leitung 1 Volt oder 1,7 % betragen.)

Will man den Spannungsverlust in einer Leitung demonstrieren, so kann man die folgende Versuchsanordnung benutzen (Fig. 49): Ein (2 bis 3 m) langer, blanker Eisendraht (Blumendraht) ist mit den Polen einer Stromquelle durch zwei kurze, dicke Kupferdrähte verbunden. An den Klemmen eines Voltmeters sind zwei Drähte befestigt (d_3 und d_4), deren freie Enden zu einer Öse umgebogen sind. Verschiebt man einen der Drähte oder beide nach der Mitte *c* hin, so wird der Ausschlag des Voltmeterzeigers kleiner etc.

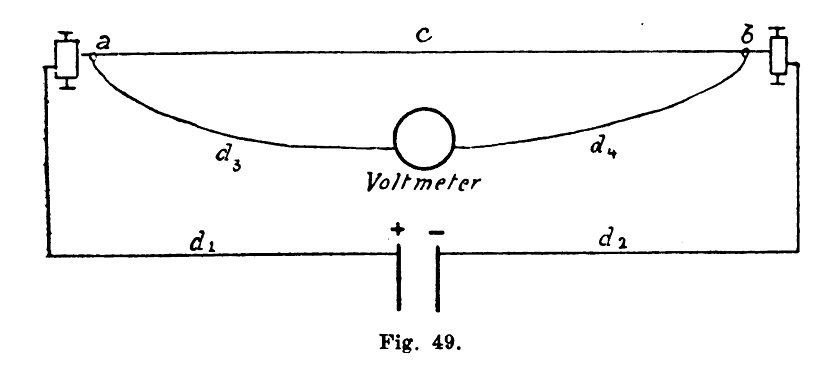


Fig. 49.

20. Joule'sche Wärme (Stromenergie).

Watt. Wir haben früher den elektrischen Strom mit einer Wasserkraft verglichen. Wollen wir nun wissen, wie gross der Effekt einer Wasserkraft ist, d. h. welche Arbeit sie in einer Sekunde verrichten kann, so messen wir 1) das Gefälle in Metern, 2) die Stromstärke in Litern (oder kg), bestimmen also, wie viel Wasser in einer Sekunde fällt. Multiplizieren wir die erhaltenen Zahlen mit einander, so erhalten wir den Effekt der Wasserkraft in mkg und, wenn wir durch 75 dividieren, in Pferdekräften. — Auch der elektrische Strom kann mechanische Arbeit thun (z. B. einen Elektromotor treiben). Diejenige Masseinheit, die wir bei der Bestimmung der Stromarbeit benutzen, ist 1 Watt. Es ist dies diejenige Arbeit, die ein Strom, dessen elektromotorische Kraft 1 Volt ist, leisten kann (in einer Sekunde), wenn die Stromstärke 1 Ampère beträgt. Ist also die Klemmenspannung einer Dynamo 100 Volt und die Stromstärke 10 Ampère, so schickt die Dynamo einen Effekt von 1000 Watt in die Leitung. Für 100 Watt ist die Bezeichnung Hektowatt, für 1000 Watt Kilowatt im Gebrauche. Die Beziehung zwischen Watt und Pferdekraft ist durch die Gleichung gegeben

$$736 \text{ Watt} = 1 \text{ PS}.$$

Wenn ein elektrischer Strom keine Maschine treibt oder nicht chemisch zersetzend wirkt, so wird die ganze Stromenergie in der Leitung und in der Stromquelle selbst in Wärme

umgesetzt. Leistet aber der elektrische Strom Arbeit, so wird nur ein Teil der elektrischen Energie in Wärme verwandelt. Wir wollen nun auseinandersetzen, wie man diese Wärme berechnen kann: Beträgt der Spannungsverlust in einem Leiter 1 Volt und ist die Stromstärke 1 Ampère, so beträgt der Energieverlust in der Leitung 1 Volt $\times$ 1 Ampère = 1 Watt oder, da 1 Watt = $\frac{1}{736}$ PS und 1 PS = 75 mkg, $\frac{75}{736}$ mkg. (Hier ist zu ergänzen „in 1 Sekunde“, da ja Stromstärke die in einer Sekunde fliessende Elektricitätsmenge ist.) Wie wir aber früher mitgeteilt haben, sind 424 mkg äquivalent 1 Kalorie oder 1000 Grammkalorien (Grammkalorie ist die Wärmemenge, die man 1 g Wasser zuführen muss, wenn man seine Temperatur um 1° C. erhöhen will). Daher ist

$$1 \text{ Watt äquivalent } \frac{75}{736} \cdot \frac{1000}{424} = 0{,}24 \text{ Grammkalorien.}$$

Ist der Spannungsverlust in einem Leiter v Volt und die Stromstärke a Ampère, so ist die in dem Leiter erzeugte Wärme q gleich

$$q = v \,.\, a \,.\, 0{,}24 \text{ Grammkalorien.}$$

In dieser Gleichung können wir, da nach dem früher Mitgeteilten der Spannungsverlust v gleich dem Widerstande w des Leiters mal der Stromstärke a ist, statt v setzen w . a und erhalten

$$q = 0{,}24 \,.\, w \,.\, a^2 \text{ Grammkalorien (pro Sekunde).}$$

Aus dieser Gleichung kann man folgende Sätze ablesen:

1) Die in einem Leiter erzeugte Wärmemenge ist proportional dem Widerstande.

Sind also in einem Stromkreise 2 Drähte von 1 Ohm resp. 2 Ohm Widerstand hintereinander eingeschaltet, so ist die in dem zweiten Drahte erzeugte Wärmemenge doppelt so gross wie die in dem ersten Drahte erzeugte Wärme.

2) Die in einem Leiter erzeugte Wärmemenge ist proportional dem Quadrate der Stromstärke.

Schickt man also durch eine Leitung einmal einen Strom von 1 Ampère, ein zweites Mal einen Strom von 2 Ampère,

so ist im zweiten Falle der Energieverlust 4mal so gross wie im ersten Falle.

Die beiden mitgeteilten Gesetze heissen die Joule'schen Gesetze. Wir werden später sehen, eine wie grosse Rolle diese Gesetze bei elektrischen Kraftübertragungen spielen.

Sechstes Kapitel.

Messung der Stromstärke und der elektromotorischen Kraft.

21. Messung der Stromstärke.

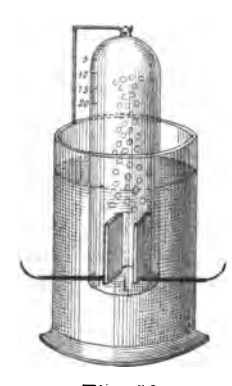
Von den drei elektrischen Masseinheiten Ohm, Ampère und Volt haben wir die erste definiert. (Die gegebene Definition ist keine streng wissenschaftliche; diejenigen Leser, denen die Definition für die Masseinheit Ohm und die folgende für Ampère nicht genügt, finden die nötige Aufklärung in dem Anhange dieses Buches.) Nun sind die genannten Masseinheiten durch das Ohm'sche Gesetz, dem wir die Form geben können

$$1 \text{ Ampère} = \frac{1 \text{ Volt}}{1 \text{ Ohm}},$$

mit einander verbunden. Es genügt daher, wenn wir noch die Masseinheit Ampère oder Volt definieren.

Wie wir wissen, zersetzt der elektrische Strom das Wasser. Je stärker ein Strom ist, um so mehr Wasser zersetzt er in einer bestimmten Zeit, etwa in einer Minute. Ein Strom also, der in einer Minute 2, 3 etc. ccm Knallgas (Seite 22) liefert, ist 2-, 3- etc. mal so stark wie ein Strom, der in derselben Zeit 1 ccm Knallgas liefert. Dies drücken wir in der Sprache der Mathematik so aus: „Die Stromstärke ist proportional der Menge des in einer Minute entwickelten Knallgases". Als Einheit der Stromstärke benutzte man früher

die Jacobi'sche Einheit. Ein elektrischer Strom hat die Stärke einer Jacobi'schen Einheit, wenn er in einer Minute 1 ccm Knallgas liefert. (Da das Volumen eines Gases von der Temperatur und dem Luftdrucke abhängig ist, so ist zu dem Vorigen noch hinzuzufügen: „bei der Temperatur 0° C. und dem Barometerstande 760 mm".) Ein Ampère ist gleich 10,5 (genauer 10,44) Jacobi'schen Einheiten. Ein Strom ist also 1 Ampère stark, wenn durch denselben in einer Minute 10,5 ccm Knallgas entwickelt werden. Wollen wir also die Stärke eines Stromes in Ampère erhalten, so schicken wir den Strom 1 Minute lang durch einen Wasserzersetzungsapparat, fangen die sich entwickelnden Gase auf, messen ihr Volumen in Kubikcentimetern und dividieren die erhaltene Zahl durch 10,5. Apparate, die dazu dienen, die Stromstärke in der beschriebenen Weise zu messen, nennt man Voltameter. Figur 50 stellt ein Voltameter einfachster Art dar. Das Messgläschen ist nach Kubikcentimetern eingeteilt. Bei einem Versuche wird dasselbe mit angesäuertem Wasser angefüllt, mit seinem unteren Ende in die Flüssigkeit des Zersetzungsapparates eingetaucht und dann an dem Halter aufgehängt.


Fig. 50.

Wir haben gehört (Seite 43), dass der spec. Leitungswiderstand der Flüssigkeiten gross ist. Schicken wir also einen elektrischen Strom durch den Wasserzersetzungsapparat, so vergrössern wir den äusseren Widerstand beträchtlich und schwächen den Strom. Bei Benutzung des Voltameters erhalten wir demnach nicht ein Mass für die ursprüngliche Stromstärke, die eigentlich gemessen werden sollte, sondern für die verringerte. Nun können wir den Widerstand in dem Voltameter dadurch verringern, dass wir grosse Elektroden mit kleinem Abstande benutzen. Aber selbst dann, wenn wir den Widerstand in dem Apparate verschwindend klein machen, erhalten wir nicht ein Mass für den eigentlich zu messenden Strom, weil ja der

Strom in dem Voltameter chemische Zersetzungen hervorruft und infolge dieser Zersetzungen die Stromstärke geschwächt wird (siehe Polarisation S. 24 und 69).

Die folgenden Messapparate sind von diesen Übelständen frei.

Tangentenbussole. Sie besteht aus einem breiten, kreisförmig gebogenen Messingstreifen *M* (Fig. 51), dessen Enden mit zwei Klemmschrauben K_1 und K_2 leitend verbunden sind. In der Mitte des Kreises befindet sich eine Bussole *B* (Kompass). Da die Magnetnadel der Bussole sehr klein sein muss, so werden auf ihre Spitzen oft lange, feine Glasfäden befestigt, damit man eine grössere Skala erhält. Will man den Apparat benutzen, so stellt man ihn so auf, dass die Nadel in die Ebene des Kreises hineinfällt und verbindet dann die Klemmen mit den Polen der zu messenden Stromquelle. Nennen wir nun die Intensität einer ersten Stromquelle J, und ist die beobachtete Ablenkung α^0, sind ferner bei einer zweiten Stromquelle die entsprechenden Grössen J' und α'^0, so ist, wie hier ohne Beweis mitgeteilt wird, $J : J' = tg\alpha : tg\alpha'$ d. h.: die Stromstärke ist proportional der Tangente des Ablenkungswinkels. Wir sehen jetzt ein, weshalb das Instrument den Namen Tangentenbussole führt.

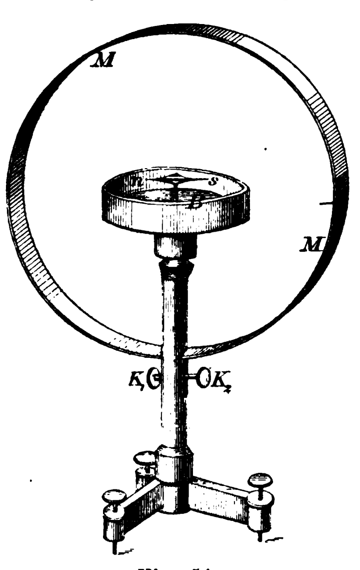


Fig. 51.

Die bequemsten Messapparate für die Stromstärke sind die Ampèremeter. Man benutzt bei den meisten Ampèremetern die anziehende Kraft, die eine von einem Strome durchflossene Drahtspirale auf einen Eisenkern ausübt. Bei dem Ampèremeter von Siemens und Halske werden zwei zu einem *H* verbundene Eisenstäbe in eine Drahtspirale, die aus einigen Win-

dungen eines dicken Drahtes besteht, hineingezogen (Fig. 52). Der Hebel *H* ist mit der leicht drehbaren Achse *A* fest verbunden, das Gewichtchen *G* hält den Stäben das Gleichgewicht. Werden die Stäbe infolge der Einwirkung des

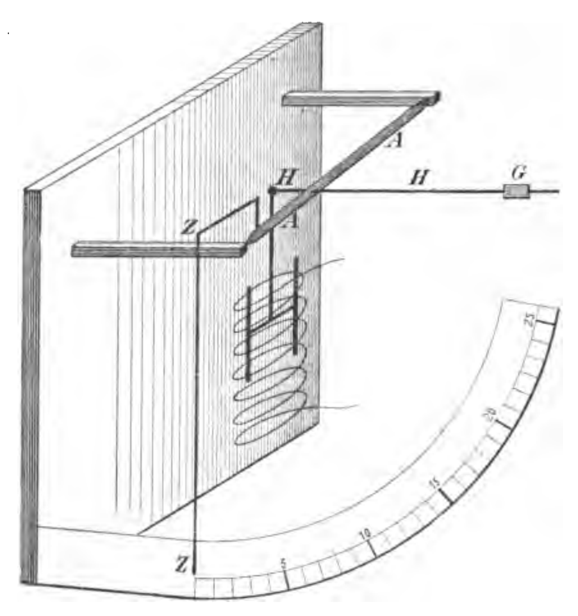


Fig. 52.

Stromes in die Spule hineingezogen, so dreht sich *A* und mit ihr der Zeiger *Z*, dessen Ende auf der in Ampère eingeteilten Skala spielt.

Da die Ablenkung des Zeigers nicht proportional der Stromstärke ist, wie man aus Fig. 53 ersieht, so wird jeder Apparat in der Weise geaicht, dass man Ströme, deren Intensität bekannt ist, durch den Apparat fliessen lässt.

Die elektromotorische Kraft ist gleich 1 Volt, wenn bei einem Gesamtwiderstande von 1 Ohm die Stromstärke 1 Ampère ist. Setzt man nämlich in der Gleichung „$J = \frac{E}{W}$" $J = 1$ (Amp.) und $W = 1$ (Ohm), so ist

$E = 1$. Da $E = J . W$, so kann man die elektromotorische Kraft in Volt berechnen, wenn man die Stromstärke in Ampère und den Widerstand in Ohm kennt. Ist z. B. $J = 3$ Ampère und $W = 6$ Ohm, so ist $E = 6 . 3$ Volt.

Man kann aber die elektromotorische Kraft mit Hülfe der Voltmeter (nicht zu verwechseln mit Voltameter) auch experimentell bestimmen. Die Konstruktion der Voltmeter ist im allgemeinen dieselbe wie die der Ampèremeter; während aber in den Ampèremetern der Strom nur einen verschwindend kleinen Widerstand findet, ist der Leitungswiderstand in den Voltmetern sehr gross. Man lässt nämlich in den Voltmetern den Strom durch sehr viele Windungen eines dünnen Drahtes fliessen. Nehmen wir an, der Widerstand in einem Voltmeter sei gleich 100 Ω, also so gross, dass man den inneren Widerstand der Stromquelle im Vergleich zu ihm vernachlässigen kann, dann ist für eine Stromquelle, deren elektromotorische Kraft wir E_1 und deren Stromstärke wir J_1 nennen,

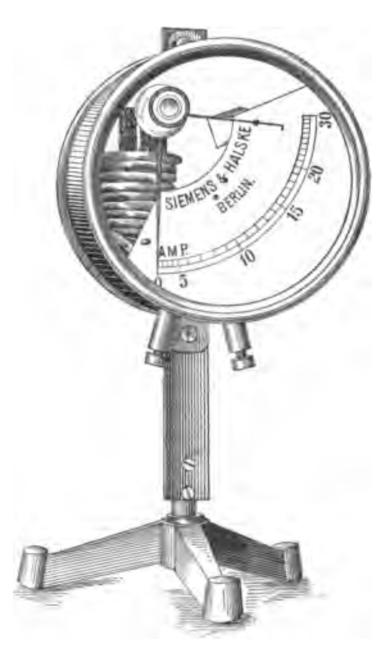


Fig. 53.

$$J_1 = \frac{E_1}{100} \text{ (der innere Widerstand ist vernachlässigt)}$$

und für eine zweite Stromquelle:

$$J_2 = \frac{E_2}{100}.$$

Es folgt: $J_1 : J_2 = E_1 : E_2$. Da nun auch, wenn es sich um Ablenkungen einer Magnetnadel handelt, $J_1 : J_2 = tg\alpha_1 : tg\alpha_2$,

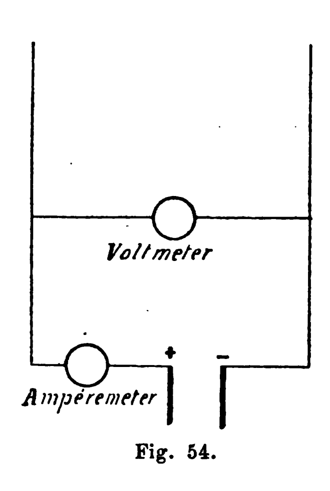


Fig. 54.

so ist $E_1 : E_2 = tg\alpha_1 : tg\alpha_2$ und bei kleinen Ablenkungen $E_1 : E_2 = \alpha_1 : \alpha_2$, d. h. die Ablenkung ist (bei kleinen Drehungswinkeln) proportional der elektromotorischen Kraft.

Die elektromotorische Kraft der meisten galvanischen Elemente liegt zwischen 1 und 2 Volt.

Wie man die Stromstärke und die Spannung zugleich misst, wird durch die Figur 54 veranschaulicht. (Das Voltmeter liegt im Nebenschluss.)

Siebentes Kapitel.

Stromverzweigung und Wheatstone'sche Brücke.

22. Stromverzweigung.

Stromverzweigungen, von denen im Vorhergehenden schon mehrfach die Rede war, kommen in der Praxis oft vor.

Ein elektrischer Strom fliesse von dem positiven Pole einer Stromquelle durch einen Draht nach *a* (Fig. 55), dort verzweige sich die Leitung; dann fliesst ein Teil des Stromes durch den „Zweig" *acb*, der Rest durch *adb*; bei *b* vereinigen sich die Ströme wieder.

1) Offenbar ist nun in den Zweigen die Stromstärke nicht so gross wie in *Pa* und *P'b*. Nennen wir die Stromstärke in *Pa* und *P'b* „J", diejenige in *acb* und *adb* i_1 und i_2, so ist, was keines Beweises bedarf, $J = i_1 + i_2$. (Man denke an eine verzweigte Wasserleitung.)

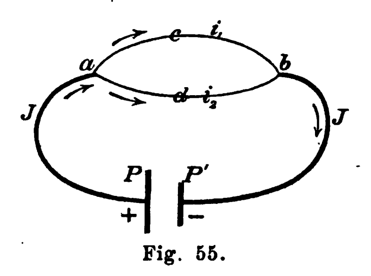


Fig. 55.

2) Bezeichnen wir den Spannungsunterschied der Punkte *a* und *b* mit e_1, so sinkt die Spannung in jedem der beiden Zweige um e_1 Volt. Nun ist aber der Spannungsverlust in einem Leiter gleich der Stromstärke multipliziert mit dem Widerstande (s. S. 54). Ist also der Widerstand von *acb* gleich w_1 und von *adb* gleich w_2, so ist

$$e_1 = i_1 . w_1 \text{ und } e_1 = i_2 . w_2. \text{ Daher}$$
$$i_1 . w_1 = i_2 . w_2 \text{ oder } i_1 : i_2 = w_2 : w_1,$$

d. h.: „die Stromstärken der Zweigströme verhalten sich umgekehrt wie die Widerstände in den bezüglichen Zweigen.“ Ist z. B. der Leitungswiderstand in *acb* doppelt so gross wie in *adb*, so ist $i_2 = 2\, i_1$ und $i_1 = \frac{J}{3}$.

3) Angenommen die Pole einer Stromquelle seien durch einen Draht, dessen Leitungswiderstand w Ω betrage, mit einander verbunden; dann ist $e = i.w$, wenn i die Stromstärke in dem Drahte und e die Klemmenspannung ist. Verbinden wir nun die Pole noch durch einen zweiten Draht, der dem Strome denselben Widerstand wie der erste entgegensetzt, so fliesst auch durch diesen Draht ein Strom von i Ampère, denn auch in ihm sinkt die Spannung um e Volt. Mithin ist jetzt die Stromstärke doppelt so gross $(i + i)$ oder der gesamte Widerstand nur halb so gross wie eben $\left[\frac{e}{\frac{w}{2}} = \frac{2\,e}{w} = 2\, i\right]$.

Wir können also, wenn wir den Leitungswiderstand in einer Leitung verringern wollen, statt eines dicken Drahtes mehrere dünne Drähte neben einander legen, d. h. die Drähte parallel schalten (Fig. 56 S. 64). Was vom ganzen Stromkreis gesagt ist, gilt auch für einzelne Teile desselben.

Wheatstone'sche Brücke: Die beiden Zweige *acb* und *adb* seien durch einen Leiter *cd*, die sogenannte Brücke, mit einander verbunden; in die Brücke sei das Galvanoskop *G*

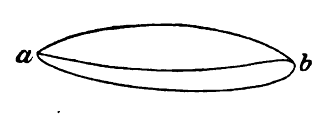


Fig. 56.

(Fig. 57) eingeschaltet. Wir wollen nun ermitteln, unter welcher Bedingung durch die Brücke kein Strom fliesst. Soll durch *c d* keine Elektricität fliessen, so muss die

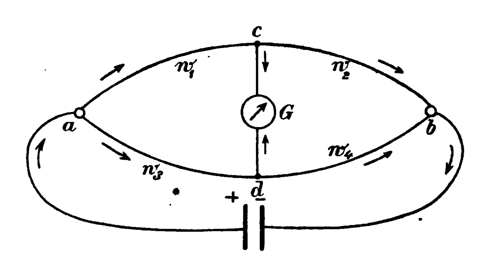


Fig. 57.

Elektricität, die durch *a c* hindurchgeht, auch durch *c b* fliessen. Bezeichnen wir also die Stromstärke in *a c* mit i_1, so ist

Stromstärke in *a c* = Stromstärke in *c b* = i_1.

Analoges gilt für den unteren Zweig *a d b*:

Stromstärke in *a d* = Stromstärke in *d b* = i_2.

Ferner kann die Brücke nur dann stromlos sein, wenn in *c* dieselbe Spannung herrscht wie in *d* (bei Wasserleitungen würden wir sagen: wenn *c* und *d* gleich hoch liegen). Daraus folgt, dass

das Potentialgefälle in *a c* = dem Potentialgefälle in *a d* und
" " " *c b* = " " " *d b*.

Nun ist das Potentialgefälle in $a c = i_1 . w_1$ und in $a d = i_2 . w_3$
" $c b = i_1 . w_2$ " " $d b = i_2 . w_4$

Daher ist

$$i_1 . w_1 = i_2 . w_3 \text{ und}$$
$$i_1 . w_2 = i_2 . w_4.$$

Dividiert man diese beiden Gleichungen durch einander, so ergiebt sich:

$$w_1 : w_2 = w_3 : w_4.$$

Diese Bedingung muss also erfüllt sein, wenn *c d* stromlos sein soll, und umgekehrt: wenn diese Bedingung erfüllt ist, so fliesst durch die Brücke kein Strom.

Wir können nun die Brückenvorrichtung benutzen, um den Widerstand eines Leiters zu messen. Zu dem Zwecke schalten wir in die Brücke ein Galvanoskop ein, benutzen für *ac* und *cb* bekannte Widerstände (etwa 1 Ω), schalten in den Zweig *ad* einen veränderlichen Widerstand ein (Stöpselrheostat) und machen endlich den zu messenden Widerstand zum vierten Zweigstücke *db*. Nun verändern wir den Widerstand in *ad* so lange, bis die Nadel des Galvanoskops keinen Ausschlag zeigt (die Brücke ist dann stromlos); es ist dann (da $w_1 = w_2 = 1\ \Omega$) $w_3 = w_4$.

Die Hintereinanderschaltung und Parallelschaltung von Lampen, Motoren etc. Nehmen wir an, es sollen mehrere Lampen, beispielsweise drei, durch dieselbe Stromquelle gespeist werden. Der Leitungswiderstand in jeder Lampe sei 100 Ω (wenn der Glühfaden heiss ist); der Strom, der durch jede Lampe hindurchfliessen muss, wenn sie normal brennen soll, möge $^1/_2$ Ampère betragen.

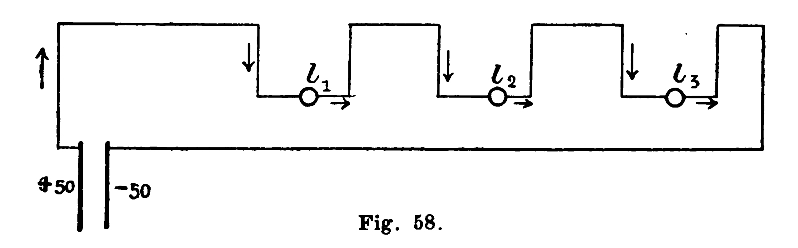


Fig. 58.

1) Sind die Lampen hintereinander geschaltet (Fig. 58), so ist der ganze Widerstand im Stromkreise, wenn wir den Leitungswiderstand in den Drähten und in der Maschine vernachlässigen, 300 Ω. Die Klemmenspannung der Maschine muss daher nach dem Ohm'schen Gesetze $300 \cdot {}^1/_2$ Volt $= 150$ Volt sein. Der Spannungsverlust in jeder Lampe beträgt $100 \cdot {}^1/_2$ Volt $= 50$ Volt, so dass jede Lampe $50 \cdot {}^1/_2$ Watt konsumiert. Jede Lampe ist von der anderen abhängig; brennt eine Lampe nicht, so brennt keine Lampe. Aus dem Vorigen ergiebt

sich ferner, dass bei der Hintereinanderschaltung die Spannung geteilt wird.

2) Schalten wir die Lampen parallel (Fig. 59), so haben wir es mit einer Stromverzweigung zu thun; dass dies der

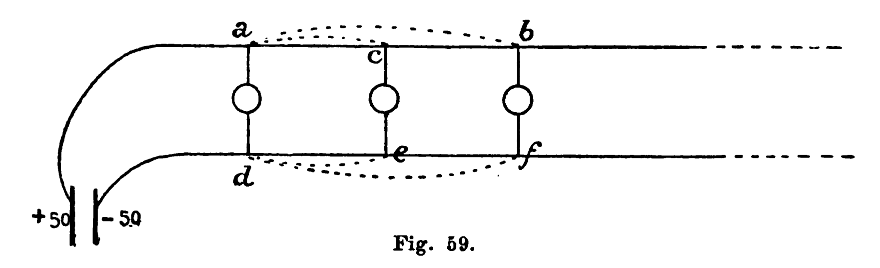


Fig. 59.

Fall ist, erkennt man deutlicher, wenn man sich die Drähte *ab* und *cd* der Länge nach geteilt denkt, wie es die punktierten Linien andeuten sollen. Nach Seite 63 ist der Widerstand im Stromkreise $\frac{100}{3}$ Ω. Soll nun jeder Lampe ein Strom von $^1/_2$ Ampère zugeführt werden, so muss der ungeteilte Strom $\frac{3}{2}$ Ampère stark sein, so dass die Klemmspannung der Maschine $\frac{3}{2} \cdot \frac{100}{3}$ Volt $=$ 50 Volt betragen muss. Die Spannung sinkt in jeder Lampe um 50 Volt (wie eben). Während aber eben die Spannung geteilt wurde, wird jetzt die Stromstärke geteilt. Fügen wir zu den drei vorhandenen Lampen noch eine vierte hinzu, und bleibt die elektromotorische Kraft der Maschine dieselbe, so ist die Stromstärke, da nunmehr der Widerstand 25 Ω $(\frac{100}{4})$ beträgt, gleich 2 Ampère und der Effekt, den die Maschine in die Leitung schickt, 100 Watt etc.

Achtes Kapitel.

Die chemischen Wirkungen des elektrischen Stromes — Elektrolyse.

23. Theorie von Clausius — Arrhenius.

In Bezug auf die elektrische Leitung unterscheidet man zwischen Leitern erster und zweiter Klasse. Leiter erster Klasse sind diejenigen, die durch den elektrischen Strom nur erwärmt, aber nicht chemisch verändert werden; in den Leitern zweiter Klasse dagegen verursacht der elektrische Strom chemische Zersetzungen, also bleibende Veränderungen (ausserdem werden sie erwärmt). Zu den Leitern erster Klasse gehören die Metalle, Kohle und einige andere Stoffe, zu den Leitern zweiter Klasse die Lösungen von Salzen und Säuren etc. Da die Leiter zweiter Klasse durch den elektrischen Strom zersetzt werden, so nennt man sie auch Elektrolyte.

(Siehe zunächst S. 21 f.) Beobachtet man die Zersetzung des Wassers genau, so sieht man, dass die Bestandteile, die sogenannten Jonen, nämlich Wasserstoff (H) und Sauerstoff (O), nur an den Elektroden ausgeschieden werden. Dasselbe gilt für jede Elektrolyse (natürlich andere Bestandteile). Eine einwandfreie Erklärung dieser auffallenden Erscheinung hat zuerst Clausius gegeben (siehe: Die mechanische Wärmetheorie von R. Clausius, 2. Auflage, 2. Band, S. 155 ff.). Arrhenius hat die Clausius'sche Theorie erweitert. Wir wollen versuchen, die Theorie von Clausius für eine bestimmte Zersetzung, nämlich die Zersetzung des Kochsalzes (Chlornatriums), darzulegen. Ein Molekül Kochsalz besteht aus einem Atom Natrium (Na) und einem Atom Chlor (Cl). Nach der genannten Theorie ist das Metallatom (Na) positiv und das Chloratom (Cl) gerade so stark negativ elektrisch. Das Molekül NaCl ist also unelektrisch. Nun sind in einer Kochsalzlösung nicht lauter Kochsalzmoleküle zwischen den

Wassermolekülen verteilt, sondern auch freie Na-Atome und freie Cl-Atome. Ferner verharren die Moleküle und Atome — Clausius sagt allgemeiner „Teilmoleküle“, die Teilmoleküle des Kupfervitriols sind Cu und SO_4 — in der Lösung nicht im Zustande der Ruhe, vielmehr bewegen sie sich rasch nach allen möglichen Richtungen. Treffen sich zwei Moleküle, so zerfallen sie in ihre Bestandteile, andrerseits finden auch Wiedervereinigungen von getrennten Atomen (Na und Cl) zu Molekülen (NaCl) statt. „Innerhalb jedes messbaren Raumes,“ sagt Clausius (S. 160), „befinden sich gleich viel positive und negative Teilmoleküle, mögen diese nun alle zu je zwei zu Gesamtmolekülen verbunden sein, oder mögen einige zwischen den Gesamtmolekülen zerstreut sein.“

Verbinden wir die Elektroden mit einer Stromquelle, so wird die eine Elektrode positiv, die andere negativ elektrisch. Die positive Elektrode wirkt anziehend auf die negativ elektrischen Atome (Cl) und abstossend auf die positiven (Na). Während eben (vor Stromschluss) keine Richtung von den Teilmolekülen bevorzugt wurde, überwiegt jetzt die Bewegung nach den Elektroden hin. Betrachtet man eine den Elektroden parallele Ebene zwischen den Elektroden (senkrecht zur Stromrichtung), so gehen durch diese in einer Sekunde eine gewisse Anzahl positiver Teilmoleküle nach der einen Richtung und eine gewisse Anzahl negativer Teilmoleküle nach der anderen Richtung hindurch. „Diese entgegengesetzte Bewegung der beiden Arten von Teilmolekülen bildet den galvanischen Strom innerhalb der Flüssigkeit.“ (Clausius, Mech. W.-Th., S. 165.)

An der positiven Elektrodenplatte kommen fortwährend (so lange der Strom fliesst) negative Cl-Atome an; es häufen sich also die negativen Bestandteile; ihre Anzahl ist grösser als die der positiven Teilmoleküle (Na). Analoges gilt für die negative Elektrode. Die an der positiven Elektrode ankommenden negativen Teilmoleküle werden an der positiven Elektrode neutralisiert und bleiben an ihr haften. Entsprechendes gilt für die positiven Bestandteile.

24. Elektrolyse des Wassers und Polarisation.

Die Versuchsanordnung ist schon auf Seite 21 beschrieben worden. Es muss nun hier hervorgehoben werden, dass eigentlich nicht das Wasser, sondern die Schwefelsäure zersetzt wird, sich aber sofort wieder neu bildet. Die Vorgänge sind nämlich die folgenden: Die Schwefelsäure (H_2SO_4) wird durch den elektrischen Strom in das Kation*) H_2 und das Anion SO_4 (Säureradikal oder Säurerest) zerlegt. SO_4 zerfällt in dem Momente, in dem es frei wird, in $SO_3 + O$. Der Bestandteil SO_3 verbindet sich mit einem Molekül Wasser (H_2O) zu H_2SO_4. Das Facit ist also das: 1 Molekül H_2SO_4 wird zerlegt, bildet sich aber sofort wieder, 1 Molekül Wasser wird chemisch gebunden, H_2 und O werden frei. Das Endresultat ist also dasselbe, wie wenn ein Molekül H_2O zerlegt worden wäre.

Die Menge der in einer bestimmten Zeit, etwa in einer Sekunde, gebildeten Gase hängt lediglich von der Stromstärke ab, also nicht von dem Widerstande in dem Apparate (Grösse und Entfernung der Elektroden, Schwefelsäuregehalt). Diesen Satz darf man aber nicht missverstehen. Experimentiert man mit einer Batterie von etwa 4 Volt Klemmenspannung, und benutzt man verschiedene Zersetzungszellen nacheinander (zeitlich), so ist die in einer Minute entstandene Gasmenge verschieden, weil der Widerstand in den Apparaten verschieden gross ist und daher auch die Stromstärke. Schaltet man aber die Zersetzungsapparate hintereinander in denselben Stromkreis ein, so entsteht in allen dieselbe Menge Knallgas.

Es entwickelt, wie der Versuch ergiebt — ausser dem Zersetzungsapparate und einem Ampèremeter schaltet man noch einen Regulierwiderstand ein — ein Strom von 1 Ampère in 1 Minute 10,44 ccm Knallgas, also ungefähr 7 ccm H und 3,5 ccm O. Wir haben früher die Beziehung zwischen

*) Man nennt die positive Elektrode Anode, die negative Kathode, den Bestandteil, der an der Anode frei wird, Anion und den anderen Kation.

dem Knallgasvolumen, das durch einen elektrischen Strom in einer Minute entwickelt wird, und der Stromstärke benutzt, um eine vorläufige Definition der Masseinheit Ampère zu geben.

Polarisation. (Siehe Seite 22.) Die elektromotorische Kraft des Polarisationsstromes hängt von der Beschaffenheit (nicht von der Grösse) der Elektroden und von der Stärke des polarisierenden Stromes ab. Jedoch erreicht die elektromotorische Kraft des Polarisationsstromes, wenn man die Spannung des polarisierenden Stromes (Batteriestromes) steigert, einen grössten Wert (Maximum), der bei weiterer Steigerung der Spannung des Hauptstromes nicht überschritten wird. Bei Platinelektroden in Wasser (+ Schwefelsäure) fand man folgende Zahlen:

Elektromotorische Kraft des polarisierenden Stromes	Elektromotorische Kraft des Polarisationsstromes
1 Volt	1 Volt
1,5 „	1,5 „
2 „	2 „
2,5 „	2,5 „
2,7 „	2,7 „
3 „	2,7 „
5 „	2,7 „

Man muss daher bei der Elektrolyse des Wassers eine Stromquelle benutzen, deren elektromotorische Kraft grösser als 2,7 Volt ist (z. B. zwei Bunsen'sche Elemente).

25. Elektrolyse der Salze.

Jedes Salz besteht aus zwei Bestandteilen, von denen der eine ein Metall, der andere ein Säurerest (SO_4 etc.), oder Chlor, oder Sauerstoff etc. ist. Bei der Elektrolyse wird nun das Salz in diese seine Bestandteile zerlegt.

Beispiel: Elektrolyse des Kupfervitriols ($CuSO_4$).

Füllen wir den Zersetzungsapparat (Fig. 17), der Elektroden aus Platin habe, mit concentrierter Kupfervitriollösung ($CuSO_4 + H_2O$), so wird $CuSO_4$ zerlegt in

Cu (negative Elektrode) und SO_4 (positive Elektrode).

Das Cu wird in feinst verteiltem Zustande an der negativen Elektrode ausgeschieden und lagert sich auf derselben, wenn der Strom nicht zu stark ist, als gleichmässige Schicht ab (pro Minute und Ampère 19,79 mg). Das Säureradikal SO_4 verbindet sich mit einem Molekül H_2O zu H_2SO_4, während Sauerstoff frei wird. Auch hier entsteht ein Polarisationsstrom, denn Cu und Platin in verdünnter Schwefelsäure bilden ein galvanisches Element. Will man verhindern, dass sich freie Schwefelsäure bildet, und soll die Lösung concentriert bleiben, so benutze man als positive Elektrode eine Kupferplatte. Es verbindet sich dann der Schwefelsäurerest SO_4 mit Cu zu einem Molekül $CuSO_4$. Diesen letzteren Prozess (Bildung von neuem $CuSO_4$) dürfen wir nicht der Stromwirkung zuschreiben, denn Cu und SO_4 verbinden sich ohne Mitwirkung des elektrischen Stromes zu $CuSO_4$. Wir nennen Prozesse, die nicht (oder doch nur indirekt) eine Wirkung der Stromthätigkeit sind, *sekundäre Prozesse*.

In vielen Fällen gehen *sekundäre Prozesse an den beiden Elektroden* vor sich, d. h. sowohl das Anion als auch das Kation gehen mit den Elektroden selbst oder mit dem Wasser neue Verbindungen ein. Wird z. B. schwefelsaures Natron (Na_2SO_4) elektrolysiert, so besteht die Stromwirkung darin, dass Na_2SO_4 in Na_2 und SO_4 zerlegt wird.

$$\text{Stromwirkung: } Na_2SO_4 = Na_2 + SO_4.$$

Benutzen wir nun Platinelektroden, so bleiben die Platinelektroden, da weder Na noch SO_4 auf Platin einwirkt, unverändert, dagegen verbinden sich sowohl Na_2 als auch SO_4 mit H_2O:

Sekundäre Prozesse:

$$Na_2 + 2H_2O = H_2 + 2Na\,OH \text{ (negative Elektrode), und}$$
$$SO_4 + H_2O = H_2SO_4 + O \text{ (positive Elektrode).}$$

Das Aetznatron (NaOH) löst sich, sowie es entsteht, im Wasser (Natronlauge), Wasserstoff und Sauerstoff werden frei. (Wir haben es also auch hier nebenbei mit einer indirekten Zersetzung des Wassers zu thun.)

Man kann also das Metall Na aus einer Lösung eines

Natriumsalzes ohne Anwendung von Kunstgriffen nicht gewinnen. Dasselbe gilt für Kalium und Magnesium.

Will man die Bildung der Natronlauge und der Säure durch einen Versuch zeigen, so benutze man eine U-förmige Röhre, die man mit einer durch Lackmustinktur schwach blau gefärbten Lösung von Na_2SO_4 füllt. Geht der Strom einige Zeit durch die Flüssigkeit hindurch, so färbt sich die Lösung in dem einen Schenkel rot, in dem anderen intensiv blau.

26. Das Faraday'sche Gesetz.

In der Chemie setzt man das Gewicht eines Atoms Wasserstoff gleich 1 und sagt: „Das Atomgewicht des H ist gleich 1". Die Atomgewichte der anderen Elemente vergleicht man mit dem Atomgewichte des H. So ist z. B. das Atomgewicht des Sauerstoffs (O) gleich 16, d. h. ein Atom O ist 16mal so schwer wie ein Atom H. Einige Atomgewichte, die wir benutzen, schreiben wir nieder:

O = 16	Cu = 63,18
Cl = 35,4	Ag = 107,6
Na = 23	Fe = 55,88

Es verbindet sich immer ein Atom Cl mit einem Atom H. Man sagt daher: das Chlor ist ein einwertiges Element. Ein Atom O aber vermag zwei Atome H zu binden ($H_2O = H—O—H$). Der Sauerstoff ist also zweiwertig. Jedes Element hat also eine bestimmte Wertigkeit in Bezug anf H (dies gilt auch für die Teilmoleküle, SO_4 z. B. ist zweiwertig).

Dass das Chlor einwertig ist, können wir auch so ausdrücken: 35,4 Gewichtsteile Chlor verbinden sich immer mit einem Gewichtsteil H. Tritt Chlor bei einem chemischen Prozesse an die Stelle des Wasserstoffs, so ersetzen stets 35,4 Gewichtsteile Cl einen Gewichtsteil H; 35,4 Gewichtsteile Chlor sind also äquivalent einem Gewichtsteil H oder kürzer: das Äquivalentgewicht (die Äquivalenz) des Chlors ist 35,4.

Da sich ein Atom Sauerstoff mit 2 Atomen H verbindet, so verbinden sich 16 Gewichtsteile O mit 2 Gewichtsteilen H

oder 8 Gewichtsteile O mit einem Gewichtsteile H. Daher ist das Äquivalentgewicht des O gleich 8.

Man erhält also das Äquivalentgewicht, indem man das Atomgewicht durch die Wertigkeit dividiert.

Einige Elemente haben zwei verschiedene Wertigkeiten, also auch zwei verschiedene Äquivalentgewichte. Beispiel: In der Verbindung $CuSO_4$ ist Cu zweiwertig, denn SO_4 ist zweiwertig (cf. H_2SO_4); ebenso ist Cu zweiwertig in dem Kupferchlorid $CuCl_2$ (Cl ist einwertig) oder in Cl — Cu — Cl. Man nennt die Salze, in denen das Cu zweiwertig ist, Cuprisalze. In Bezug auf die Cuprisalze ist also das Äquivalentgewicht des Kupfers $\frac{63,18}{2} = 31,59$.

Es giebt aber auch Kupfersalze, in denen das Cu mit nur einem Atom eines einwertigen Elementes oder mit einer einwertigen Gruppe (Teilmolekül) verbunden ist. Diese Salze nennt man Cuprosalze: Cu_2O (Cu—O—Cu), CuCl. Hier ist das Äquivalentgewicht des Kupfers $\frac{63,18}{1} = 63,18$.

Schalten wir eine Reihe von Zersetzungszellen, in denen sich verschiedene Salzlösungen befinden, hintereinander, so dass also durch alle derselbe Strom fliesst, so werden in allen äquivalente Mengen der Bestandteile der Elektrolyte ausgeschieden (Faraday'sches Gesetz).

Beispiel: Die Elektrolyte seien H_2O, $CuSO_4$, CuCl und $AgNO_3$ ($AgNO_3$ entsteht aus HNO_3 = Salpetersäure, Ag ist also einwertig). Die Stromstärke betrage 1 Ampère, die Elektrolyse dauere so lange, bis sich 1 mg H gebildet hat.

Verbindung	Atomgewicht	Wertigkeit	Äquivalentgewicht	Es werden abgeschieden
H_2O	H = 1, O = 16	0 = 2	0 = 8	8 mg O
$CuSO_4$	Cu = 63,18	2	31,59	31,59 „ Cu
CuCl	Cu = 63,18	1	63,18	63,18 „ Cu
$AgNO_3$	Ag = 107,6	1	107,6	107,6 „ Ag

Neuntes Kapitel.

Wechselwirkungen zwischen Strömen und Stromleitern.

27. Anziehung und Abstossung zweier Ströme (Elektrodynamik — Elektrodynamometer).

Wir haben früher mehrfach betont, dass ein Stromleiter auf Magnete gerade so einwirkt wie ein Magnet. Es drängt sich uns nun die Frage auf: verhalten sich zwei Stromleiter zu einander wie zwei Magnete, und verhält sich ein Stromleiter einem Drahte gegenüber ebenso oder ähnlich wie ein Magnet gegenüber unmagnetischem Eisen? Von den Polen eines Magnets gehen Kraftlinien aus, zwei Magnetpole stossen sich ab oder ziehen sich an, ein Magnet erregt in unmagnetischem Eisen Magnetismus.

1) Kraftlinien der Stromleiter. Ein vertikal gespannter, dicker Kupferdraht gehe durch ein Loch in einem Kartonblatte hindurch; das Blatt liege horizontal und werde mit Eisenpulver bestreut. Schicken wir nun einen starken Strom von 10—15 Ampère durch den Draht und klopfen leise gegen das Blatt, so ordnen sich die Eisenteilchen zu Kreisen, deren gemeinsamer Mittelpunkt der Punkt ist, in dem sich Draht und Kartonblatt schneiden.

2) Jetzt untersuchen wir, ob zwei Ströme anziehende oder abstossende Kräfte aufeinander ausüben. Wir benutzen für die Versuche das Ampère'sche Gestell. Nähern wir der Seite *ab* des Rechtecks (Fig. 26) einen zweiten Stromleiter, etwa einen geraden Draht, der *ab* parallel läuft, so beobachten wir, wenn wir nicht zu schwache Ströme benutzen, eine Drehung des Rechtecks und zwar erfolgt Anziehung oder Abstossung, je nachdem die beiden parallelen Ströme gleichgerichtet (beide etwa von oben nach unten fliessen) oder entgegengesetzt gerichtet sind.

Zwei gleich gerichtete parallele Ströme ziehen sich an, zwei entgegengesetzt gerichtete parallele Ströme stossen sich ab.

Da auf den beweglichen Stromkreis (das Rechteck in Fig. 26) der Erdmagnetismus einwirkt, so gelingen die Versuche besser und mit schwächeren Strömen, wenn wir statt eines einfachen Drahtrechtecks einen sog. astatischen Stromkreis (Fig. 60) benutzen. Auf die beiden Hälften dieses Stromkreises wirkt der Erdmagnetismus im entgegengesetzten Sinne drehend. (Gerade wie bei einem astatischen Nadelpaar, cf. Galvanometer.)

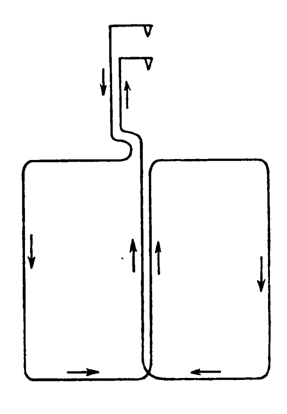


Fig. 60.

Ströme, die nicht parallel sind, nennt man gekreuzte Ströme.

Zwei gekreuzte Ströme suchen sich so zu stellen, dass sie parallel laufen und der Strom in beiden dieselbe Richtung hat.

Um diesen Satz experimentell zu beweisen, benutzen wir wieder das Ampère'sche Gestell und den astatischen Stromkreis. Nähert man einer Seite des Rechtecks einen horizontalen Draht, durch den ein Strom fliesst, so dass der Leitungsdraht mit der Seite des Rechtecks einen beliebigen Winkel bildet, so wird der astatische Stromkreis in einer dem mitgeteilten Satze entsprechenden Richtung gedreht.

Man nennt die Kraft, mit der zwei Stromleiter auf einander wirken, elektrodynamische Kraft und die Lehre von der Einwirkung galvanischer Ströme auf einander Elektrodynamik.

Die Grösse der elektrodynamischen Kraft ist proportional dem Produkte der beiden Stromstärken.

Elektrodynamometer. Um die Stromstärke eines Wechselstromes zu messen, bedient man sich der Elektro-

dynamometer. Dieselben bestehen in den meisten Fällen aus einer festen und einer beweglichen Drahtspule, deren Windungsebenen senkrecht auf einander stehen. Schickt man durch die beiden Spulen denselben Strom, so ist die drehende Kraft proportional dem Quadrate der Stromstärke (ist $i = i_1$, so ist $i . i_1 = i^2$). Der elektrodynamischen Kraft wirkt eine Spiralfeder oder die Torsionskraft eines Metallfadens entgegen. Leitet man durch die Drahtrollen Wechselströme, so kehrt sich der Strom in den beiden Rollen gleichzeitig um, so dass die Richtung der Ablenkung der beweglichen Spule sich nicht ändert, wenn die Stromrichtung sich ändert. Die Grösse der Ablenkung ist ein Mass für das Quadrat der mittleren Intensität des Wechselstromes.

Sind die Spulen eines Elektrodynamometers nicht hintereinander geschaltet — wie eben angenommen wurde —, so kann man die eine in den Hauptschluss, die andere unter eventueller Benutzung eines Vorschaltwiderstandes in den Nebenschluss bringen. Dann ist die Stromarbeit proportional der Ablenkung. (Die Spule, durch die der ganze Strom fliesst, entspricht gleichsam dem Ampèremeter, die im Nebenschluss liegende dem Voltmeter. Selbstverständlich m i s s t die erste Spule n i c h t die Stromstärke, die zweite nicht die Spannung; wir dürfen aber wohl sagen: die erste Spule erhält die Stromstärke, die zweite die Spannung.) Ist die Stromstärke in der ersten Spule J, in der zweiten i und ist α der Drehungswinkel, so ist

$$J . i = C . \alpha,$$ wo C eine Konstante ist.

Ist ferner E die Spannung und W der Widerstand in der Spule, die im Nebenschlusse liegt, plus dem Vorschaltwiderstande, so ist

$$E = i . W$$ (siehe Spannungsverlust).

Die zu messende Arbeit A ist endlich gleich

$$A = E . J.$$

Aus der ersten Gleichung folgt

$$J = \frac{C . \alpha}{i},$$ nach der zweiten Gleichung ist $E = i . W$,

daher

$$A = J . E = C \alpha . W.$$

Kennt man also C und W, so kann man die Stromarbeit mit Hülfe des Winkels α berechnen.

28. Die Volta-Induktion.

Bildet man aus zwei langen isolierten Drähten einen Doppeldraht, so dass die beiden Drähte dicht nebeneinander

herlaufen, und verbindet man die Enden des einen Drahtes mit einer Stromquelle, die Enden des anderen Drahtes mit einem empfindlichen Galvanoskop (Fig. 61), so beobachtet man in dem Augenblicke, in dem man den Batteriestrom, den Hauptstrom oder primären Strom, schliesst, eine Ablenkung der Magnetnadel des Galvanoskops. Bleibt der Hauptstrom geschlossen, so kehrt die Nadel in ihre Ruhelage zurück. Unterbricht man aber den Hauptstrom, so wird die Nadel wieder abgelenkt, aber jetzt nach der der vorigen entgegengesetzten Seite. Beim Öffnen sowohl wie beim Schliessen des Hauptstromes entsteht also in dem benachbarten Leiter ein elektrischer Strom, ein Induktionsstrom. Die Versuche ergeben ferner, dass der beim Schliessen des primären Stromes induzierte Strom die entgegengesetzte; beim Öffnen dieselbe Richtung hat wie der Hauptstrom.

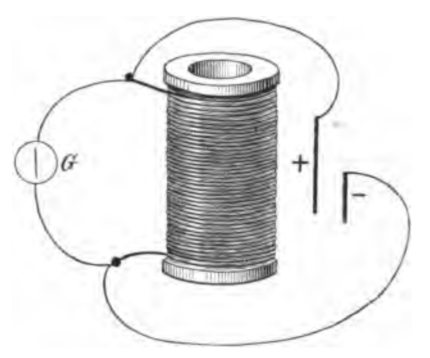


Fig. 61.

Die Induktionsströme werden stärker, wenn man in das Innere der Spule einen weichen Eisencylinder oder noch besser ein Bündel Eisenstäbe hineinstellt. Indem diese nämlich durch den Hauptstrom magnetisiert werden, erregen sie in dem Nebendrahte, d. h. in dem Drahte, der mit dem Galvanoskop verbunden ist, Ströme, welche die bei dem Öffnen und Schliessen der Kette entstandenen Ströme verstärken.

Ein geschlossener Stromkreis induziert in einem benachbarten Leiter elektrische Ströme, wenn die Stromstärke sich ändert. Schaltet man also in den primären Stromkreis einen Kurbelrheostat ein und dreht die Kurbel schnell, so entstehen in einem benachbarten Drahte Induktionsströme.

Nähert man endlich einem stromdurchflossenen Leiter einen stromlosen Leiter, so entsteht in dem genäherten Leiter ein Strom (ebenso bei der Entfernung).

Die angeführten Erscheinungen verstehen wir, wenn wir beachten, dass ein Stromleiter Kraftlinien aussendet. Beim Schliessen des primären Stromes entstehen die Kraftlinien und durchdringen die Windungsebenen des sekundären Drahtes, beim Öffnen verschwinden sie. Wenn man also den Hauptstrom öffnet oder schliesst, so nimmt die Anzahl der jede einzelne sekundäre Windung durchsetzenden Kraftlinien schnell ab (vom Maximum bis Null) oder zu (von Null bis zum Maximum). Aus der Maxwell'schen Regel folgt, dass die Richtung des sekundären Stromes beim Schliessen des primären Stromes die entgegengesetzte sein muss wie beim Offnen.

Selbstinduktion und Extraströme. Der primäre Strom erzeugt auch in seinem eigenen Leiter Induktionsströme und zwar bei jeder Änderung der Stromstärke, besonders also beim Öffnen und Schliessen. Dies erkennen wir am besten, wenn wir die Vorgänge in einem Solenoid betrachten. Lassen wir einen elektrischen Strom durch ein Solenoid fliessen, so wird die zuerst durchflossene Windung — da die Geschwindigkeit des elektrischen Stromes nicht unendlich gross ist, so durchfliesst der Strom nicht alle Windungen gleichzeitig — induzierend auf die zweite und dritte etc. Windung ein, etwas später die zweite Windung auf die dritte etc. Der in der zweiten, dritten etc. Windung induzierte Strom bekämpft nun beim Schliessen der Batterie den in der ersten Windung vorhandenen primären Strom. Man sieht daher wohl ein, dass ein Strom, der durch ein Solenoid (Spule, Drahtrolle etc.) geschickt wird, nicht momentan seine volle Stärke erreicht, sondern erst nach einer gewissen, allerdings ausserordentlich kleinen Zeit. (Beim Schliessen hat das Solenoid gleichsam einen grösseren Widerstand.) Beim Öffnen des Stromes unterstützt der induzierte Strom den Hauptstrom. So erklärt es sich, dass der Funke, der beim Schliessen einer Batterie entsteht, viel kleiner ist als der Funke, der beim Offnen beobachtet wird. Die Ströme, die ein Strom in seinem eigenen Leiter induziert, nennt man Extraströme und den Vorgang in dem Leiter Selbstinduktion. Ist der Leiter geradlinig, so ist die Selbstinduktion viel kleiner als bei einem Solenoide,

aber vorhanden ist sie. Einen geradlinigen Leiter kann man sich nämlich aus vielen parallel neben einander laufenden Drahtfäden bestehend denken. Durch jeden Faden fliesst ein Teil des Stromes. Daher wirkt jeder Faden auf den anderen induzierend ein.

Wir sehen also, dass es in vielen Fällen nicht gleichgültig ist, welche Form man einem Leiter giebt (gerade, spiralförmig etc.).

Will man die Extraströme in einer Drahtrolle möglichst schwach machen, so wickelt man den Draht bifilar. Zu dem Zwecke knickt man den Draht in der Mitte ein, so dass die beiden Drahthälften dicht neben einander liegen und wickelt diesen Doppeldraht auf die Rolle (induktionsfreie oder bifilar gewickelte Drahtrolle).

29. Induktionsapparate (Induktorien).

Apparate, in denen Induktionsströme, die schnell aufeinander folgen, erzeugt werden, nennt man Induktionsapparate. Da die Induktionsströme wegen ihrer Wirkungen auf unser Nervensystem zu physiologischen Zwecken, zur Erzeugung von X-Strahlen, bei der Funkentelegraphie und noch für andere Zwecke benutzt werden, so wollen wir den bekanntesten Induktionsapparat, den Ruhmkorff'schen, beschreiben.

Die wichtigsten Teile eines solchen sind: zwei Drahtspulen, nämlich eine engere mit dickerem Drahte, die Haupt- oder primäre Spule, und eine weitere mit zahlreichen Windungen eines dünneren Drahtes, die Neben- oder sekundäre Spule*), und der Stromunterbrecher. Die Enden des Hauptdrahtes stehen in Verbindung mit den Klemmschrauben K_1 und K_2, diejenigen des Nebendrahtes mit P_1 und P_2 (Fig. 62). Die primäre Spule wird in die weitere hineingeschoben und ihr Hohlraum mit einem Bündel weicher Eisenstäbe A angefüllt. Der Stromunterbrecher, der Wagner'sche Hammer,

*) Bei grösseren Induktorien ist die Drahtlänge der sek. Spule mehr als 10 km, bei den grössten 100 km.

besteht aus einem Eisenkern, der an dem einen Ende eines federnden Stahlstreifens F befestigt ist, und aus einem Stifte S. Es ist nun so eingerichtet, dass das Ende von S die Feder F berührt, wenn der Apparat nicht benutzt wird. Zwischen K_2 und S ist eine leitende Verbindung hergestellt. Verbindet man nun die Pole eines Elementes oder einer Batterie mit F und K_1 (also mit dem Hauptdrahte), so fliesst der elektrische Strom,

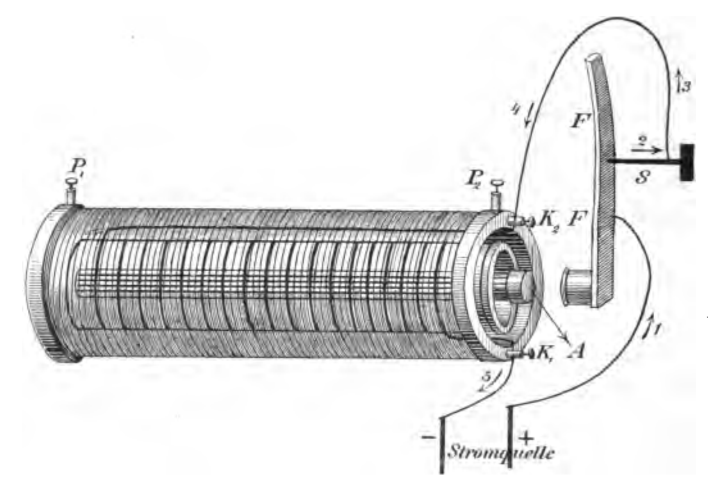


Fig. 62.

der Hauptstrom, so wie es die Pfeile andeuten, also nach F, S, K_2, durch die Windungen der inneren Spule, nach K_1 und dann zur Stromquelle zurück. Der Hauptstrom ist also geschlossen, und es wird in der Nebenspule ein Strom induziert. Gleichzeitig aber werden die Eisenstäbe im Innern der Hauptspule magnetisch (s. § 13), und ihre herausragenden Enden werden Magnetpole. Diese Pole ziehen H (Fig. 63) an. Die Folge ist, dass die Feder F den Contakt mit dem Stifte S verliert. Der Hauptstrom ist daher unterbrochen; die Eisenstäbe verlieren ihren Magnetismus, der Anker H wird von der Feder zurückgezogen und die Feder schlägt gegen den Stift S; jetzt ist der Hauptstrom wieder geschlossen.

Die beiden Spulen und der Unterbrecher sind auf einem Holzkasten montiert, in dem sich der Condensator befindet.

Dieser besteht aus einem grossen zusammengefalteten Wachstuch, das auf beiden Seiten mit Stanniol belegt ist. Die beiden Belegungen sind durch zwei Drähte mit den Enden

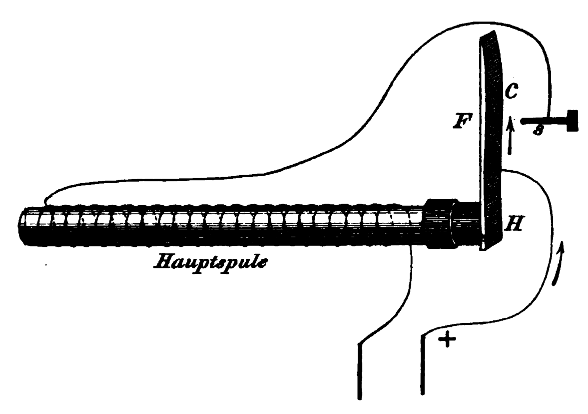


Fig. 63.

der primären Spule verbunden. Durch die Anwendung des Condensators wird die Wirkung des Ruhmkorff'schen Apparates bedeutend vergrössert. In dem Momente nämlich, in dem der primäre Strom unterbrochen wird, entsteht in der primären Spule ein starker Extrastrom. Die Elektricität des Extrastromes wird zwar dadurch, dass zwischen *F* und *s* ein glänzender Funke überspringt, entladen, ein Rest aber bleibt in der Spirale zurück. Dieser Rest würde die Induktionswirkung schwächen. Der im Nebenschluss liegende Condensator hat nun den Zweck, die Elektricität des Extrastromes aufzunehmen.

Da der sekundäre Strom eine sehr hohe Spannung hat, so liefern die Induktorien kräftige Funken. Man stellt jetzt grosse Ruhmkorff'sche Apparate her, die Funken von mehr als 50 cm Länge geben. Zur Messung der Funkenlänge bedient man sich eines Apparates (Funkenmesser), der aus einer feststehenden kreisförmigen Messingscheibe und einer dem Mittelpunkte der Scheibe gegenüberstehenden Messingspitze besteht. Die Spitze ist an einem verschiebbaren Schlitten befestigt. Platte und Spitze sind mit Klemmschrauben versehen, die

durch Drähte mit den sekundären Polen P_1 und P_2 (Fig. 62) zu verbinden sind.

Die Induktionsströme wirken stark auf unsere Nerven (physiologische Wirkungen). Zum „Elektrisieren“ genügt ein kleiner Apparat, der durch ein Element gespeist wird.

Der elektrische Funken springt im luftverdünnten Raume auf weitere Entfernungen über als im lufterfüllten. Die Geissler'schen Röhren sind Glasröhren, die Gase (atmosphärische Luft, Sauerstoff etc.) in verdünntem Zustande enthalten; an den beiden Enden sind Platindrähte eingeschmolzen, die in das Innere der Röhre hineinragen und an der Aussenseite zu einer Öse umgebogen sind. Verbindet man die beiden Platindrähte mit den Polen eines Induktionsapparates, so leuchten die Röhren in herrlichem Lichte; von dem einen Platindrahte, der positiven Elektrode, geht rotes, von dem anderen, der negativen Elektrode, blaues Licht aus. (X-Strahlen siehe S. 143.)

Zehntes Kapitel.

Dynamomaschinen und Elektromotoren für Gleichstrom.

---

30. Der Grammesche Ring.

Wir wenden uns jetzt zu den Maschinen, bei denen durch Aufwand mechanischer Arbeit elektrische Ströme von grosser Stärke erzeugt werden, und die daher in der Technik Verwendung finden. Den Ausgangspunkt für die neueren Construktionen bildet der Grammesche Ring.

Befindet sich zwischen den Polen eines Hufeisenmagnets ein Eisenring, so werden die Kraftlinien von ihrem Wege abgelenkt und gleichsam in den Ring hineingezogen. (Siehe Fig. 10.) In unserer schematischen Figur 64 sind einige der Kraftlinien angedeutet. Ein Kupferring a_1 umfasse den Eisen-

ring und möge auf demselben verschiebbar sein. Bewegen wir den Ring a_1 in die Lage a_2, so nimmt während dieser Bewegung die Anzahl der den Ring durchsetzenden Kraftlinien ab; daher wird in dem Ringe ein Strom induziert. Wird der Ring aus der Lage a_2 in die Lage a_3 gebracht, so wird die Anzahl der durch den Ring gehenden Kraftlinien grösser (erste Umkehrung der Stromrichtung); es werden aber jetzt die Kraftlinien nicht mehr von aussen nach innen, sondern von innen nach aussen, also in einem anderen Sinne durch-

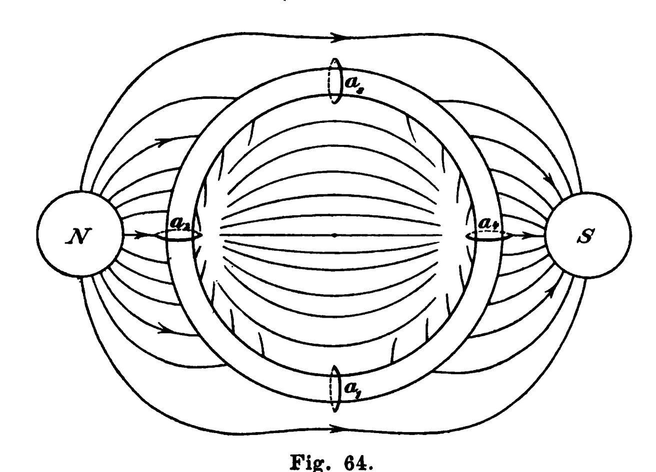


Fig. 64.

schnitten (zweite Umkehrung der Stromrichtung). Da nun eine zweimalige Umkehrung der Stromrichtung wieder zu der alten Richtung führt, so werden in dem Kupferringe während der Bewegung von a_1 über a_2 nach a_3 Ströme induziert, die dieselbe Richtung haben.

Verschieben wir den Ring aus der Lage a_3 nach a_4 und dann nach a_1, so werden während dieser Bewegung ebenfalls Ströme induziert; da aber jetzt zuerst eine Annäherung an den Südpol und dann eine Entfernung vom Südpole erfolgt, so ist die Stromrichtung die entgegengesetzte wie eben.

Macht also der Ring a_1 eine ganze Umdrehung, so entstehen in ihm Ströme, deren Richtung sich einmal umkehrt. Genau dasselbe wird erreicht, wenn wir nicht den Kupfer-

ring rotieren lassen, sondern den Eisenring mit festaufliegendem Kupferringe.

Wir wickeln nun auf unsern Eisenring, der mit einem isolierenden Überzug versehen sei, damit die induzierten Ströme nicht in den Ring fliessen, einen langen, blanken Kupferdraht so auf, dass eine Spirale mit vielen Windungen entsteht (Fig. 65). Jede einzelne Windung der Spirale können wir als einen Kreis ansehen. Den Eisenring nebst seiner Wickelung nennen wir Anker. Rotiert der Anker, so werden in den Windungen der linken Hälfte elektrische Ströme erregt, die dieselbe Richtung haben, sich also verstärken; dagegen sind die in der rechten Hälfte induzierten Ströme mit den in der linken Hälfte induzierten Strömen entgegengesetzt gerichtet. Nehmen wir nun an, dass die Ströme, die links erregt werden, nach oben, also nach i fliessen, so ergiessen sich die Ströme, die rechts induziert werden, in der entgegengesetzten Richtung, also ebenfalls nach i hin (die Punkte i und i_1, die die Mitte des oberen und unteren halben Ringes bilden, sind die „Indifferenzpunkte“). Träfen sich nun die beiden Ströme in der Spirale, so würden sie sich vernichten; werden sie aber durch den Draht D, der in i die Spirale berührt, aufgefangen, so fliessen beide, wie man aus der Fig. 66 ersieht, in derselben Richtung durch D. Der Strom fliesst durch die äussere Leitung nach i_1 und in die Spirale zurück, ist also geschlossen. Die Indifferenzpunkte i und i_1 entsprechen den Polen einer galvanischen Batterie. Wird, wie wir annehmen wollen, durch die Einwirkung der Magnetpole Elektricität aus der unteren Hälfte der Spirale in die obere getrieben, so erhält i ein höheres Potential als i_1; i ist also bei unserer Annahme der positive und i_1 der negative Pol.

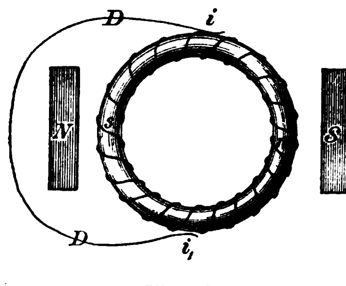


Fig. 65.

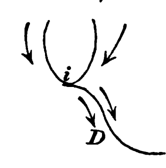


Fig. 66.

Wir haben bis jetzt angenommen, dass der Draht auf dem Ringe nicht isoliert sei, so dass *D* stets Contakt mit der Spirale hat. Dass man in Wirklichkeit die Ströme auf diese Weise nicht auffangen kann, liegt auf der Hand. Wir müssen daher eine Änderung der Konstruktion vornehmen. Betrachten wir nun die Figur 67. *N* und *S* sind die Pole des Magnets (von den Windungen auf den Schenkeln sehen wir einstweilen ab), *R* ist der Grammesche Ring. In der Mitte desselben befindet sich die Achse *A*, der sogenannte Kollektor oder Kommutator. In diese sind Messingstreifen (die dunklen Linien) eingelassen, die wir „Segmente" nennen wollen.

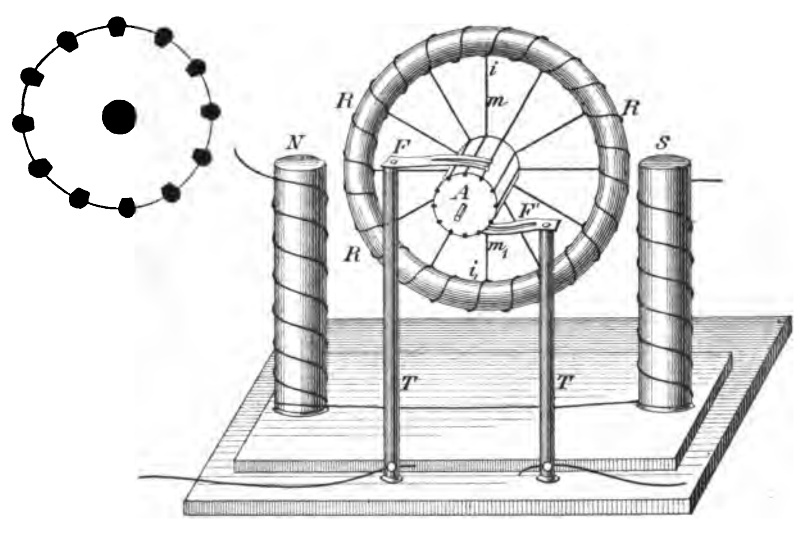


Fig. 67 (nach Müller-Pouillet).

Die Segmente sind von einander und von dem Kern der Achse durch eine isolierende Masse getrennt, wie man aus der Fig. 67 links, die einen Querschnitt durch die Achse darstellt, erkennt. Jedes Segment ist durch einen dicken Draht (Speiche) mit der Spirale leitend verbunden. Ferner sehen wir in unserer Figur, auf Säulen *T* befestigt, zwei Federn *F* und *F'*, die sogenannten Bürsten. Dieselben werden aus einem dichten Drahtgeflechte (Drahtgaze) oder aus Kohle hergestellt. Die freien Enden der Bürsten liegen auf der Achse; dreht man

den Ring, so schleifen die Bürsten auf der Achse und kommen mit den einzelnen Rippen nach und nach in Berührung.

Die induzierten Ströme fliessen, wie wir gesehen haben, nach i oder i_1. Von dort ergiessen sie sich durch die Speiche m oder m_1, eilen in das Segment, mit dem diese verbunden ist, wo sie von der Bürste abgenommen werden, gelangen aus der Bürste, die Säule S oder S_1 herabfliessend, in den Schliessungsbogen und kehren endlich in die Spirale zurück.

Die in einer einfachen Drahtspirale induzierten Ströme sind ziemlich schwach. Wir können sie dadurch verstärken, dass wir Drahtspulen mit vielen dicht neben- und übereinander liegenden Windungen auf den Ring schieben, wie es in der Figur 68 angedeutet ist. In derselben stellen $a, b, c \ldots$ die Drahtspulen dar. Die Enden der Drähte sind an die Segmente r festgelötet, und zwar so, dass das Ganze eine zusammenhängende Leitung darstellt.

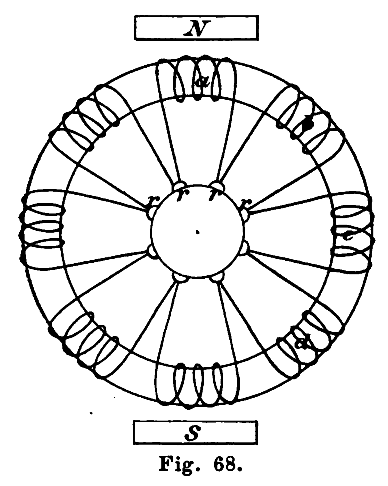


Fig. 68.

Wird bei der Konstruktion des Grammeschen Ringes ein massiver Eisenkern benutzt, so werden in dem Eisenkerne bei der Rotation ebenfalls Ströme erregt. Denn man kann sich einen Ring zusammengesetzt denken aus unendlich vielen nebeneinander liegenden Scheiben und jede Scheibe aus vielen concentrischen Ringen. Diese Ströme, die sogenannten Foucault'schen Ströme, werden durch die Bürsten nicht abgenommen. Ihre Erzeugung erfordert daher einen unnützen Kraftaufwand; ausserdem wird durch dieselben der Ring stark erhitzt. Um die Entstehung der Foucault'schen Ströme möglichst zu verhindern, macht man den Eisenkern des Ankers nicht massiv, setzt ihn vielmehr aus vielen gefirnissten Eisendrähten oder aus von einander isolierten Eisenscheiben zusammen.

31. Das dynamoelektrische oder Siemens'sche Princip.

Die Intensität der in einer elektrischen Maschine induzierten Ströme ist um so grösser, je stärker der Feldmagnet ist. Nun haben wir gesehen, dass die Elektromagnete viel stärker sind als die permanenten Stahlmagnete. Die Maschine wird daher wesentlich verbessert, wenn man an die Stelle des permanenten Magnets einen Elektromagnet setzt. Um diesen zu speisen, ist ein Strom notwendig. Wir müssen also entweder einen Batteriestrom oder den Strom einer zweiten elektrischen Maschine (Erregermaschine) durch die Windungen des Elektromagnets schicken, wie dies die Fig. 67 veranschau-

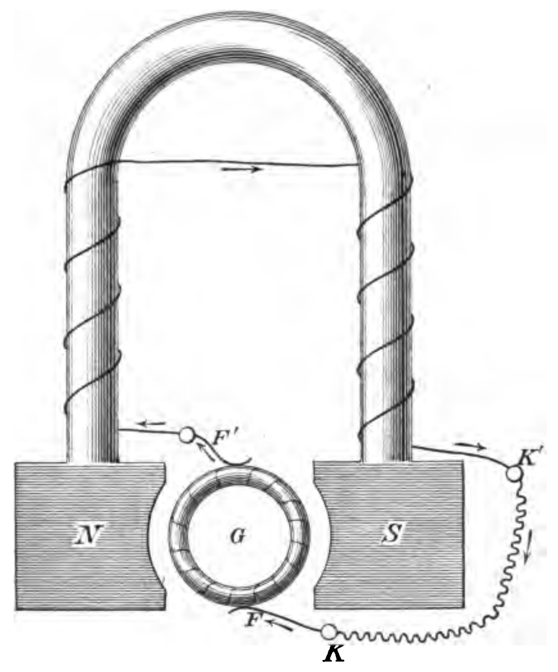


Fig. 69.

licht. W. Siemens war der Erste, der den in der Maschine selbst erzeugten Strom zur Speisung des Elektromagnets benutzte.

In der schematisierten Fig. 69 ist *G* der Grammesche Ring,

der sich zwischen den Schenkeln des Elektromagnets befindet. Der Elektromagnet (Feldmagnet) trägt unten die sogenannten Polschuhe, die an der Innenseite, damit der Ring möglichst nahe bei den Polen ist, ausgehöhlt sind. (Die Polschuhe haben die Aufgabe, dafür zu sorgen, dass möglichst viele Kraftlinien in den Eisenring eintreten.) *F* und *F'* sind die Bürsten; *F'* ist mit dem einen Drahtende des Elektromagnets fest verbunden. *K* und *K'* endlich sind die Klemmschrauben für die äussere Leitung (Zickzacklinie), die sogenannte Nutzleitung.

Wir haben nun gesehen, dass alles Eisen schwach magnetisch ist, und dass Eisen, welches einmal magnetisiert worden ist, einen Teil seines Magnetismus längere Zeit zurückbehält. Wir können daher annehmen, dass das Eisen des Elektromagnets von vorneherein eine Spur von Magnetismus hat. In den Windungen des Grammeschen Ringes wird daher bei Beginn der Rotation ein Strom von geringer Intensität induziert. Dieser schwache Strom fliesst nun, wie es durch die beigefügten Pfeile veranschaulicht wird, durch die Windungen des Elektromagnets und verstärkt dessen Magnetismus ein wenig. Da nun die Pole *N* und *S* stärker geworden sind, so wird auch die Intensität der im Anker erregten Ströme grösser. So steigern sich Strom und Magnetismus gegenseitig, und zwar so lange, bis der Elektromagnet gesättigt ist, d. h. bis sein Magnetismus nicht mehr gesteigert werden kann.

Das, was wir eben auseinandergesetzt haben, bildet den Inhalt des dynamoelektrischen Princips, welches im Jahre 1867 von W. Siemens gefunden und nach ihm das Siemens'sche Princip genannt wird.

Diejenigen Maschinen, bei denen das genannte Princip verwertet wird, nennt man dynamoelektrische und diejenigen, bei denen die Feldmagnete permanente Magnete sind, magnetelektrische. Bei allen elektrischen Maschinen aber wird mechanische Arbeit in Elektricität umgesetzt — Dynamomaschinen. Wer Gelegenheit hat, eine elektrische Handmaschine zu drehen, wird das sofort merken. Denn sobald ein Strom in der Maschine entsteht, der eine gewisse Stärke

hat, verspürt man deutlich einen Widerstand in der Maschine, das Drehen des Rades erfordert einen viel grösseren Kraftaufwand, als wenn kein Strom in der Maschine erzeugt wird.

32. Hauptstrom-, Nebenschluss-, Compoundmaschinen.

a) Dynamoelektrische Maschinen von der im Vorigen beschriebenen Art nennt man Hauptstrommaschinen, weil der ganze Strom, der in den Windungen des Grammeschen Ringes oder des Induktors erregt wird, stets durch die Windungen des Elektromagnets fliesst. Die Art der Wickelung zeigt die schematische Fig. 70. In dieser sind die Windungen des Ankers (Grammeschen Ringes) durch *A*, diejenigen des Elektromagnets durch *E* und die äussere Leitung durch die Zickzacklinie dargestellt. Diese Schaltungsweise, bei der *A*, *E* und die Nutzleitung hintereinandergeschaltet sind, nennt man Normalschaltung, Hauptschaltung oder Serienschaltung. Wird bei dieser Schaltung der äussere Widerstand grösser (oder kleiner), so wird die Stromstärke in doppelter Weise beeinflusst: zunächst nimmt die Stromstärke nach dem Ohm'schen Gesetz ab (oder zu), ferner wird, da der Feldmagnet schwächer (oder stärker) wird, die elektromotorische Kraft der Maschine kleiner (oder grösser), also auch die Stromstärke.

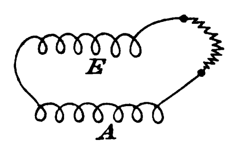


Fig. 70.

Ein anderer Nachteil der Hauptstrommaschine besteht darin, dass bei einer kurzen Stromunterbrechung in der Nutzleitung die Maschine sofort stromlos wird.

b) Bei den Nebenschlussmaschinen ist die Schaltungsweise so, wie es aus Fig. 71 ersichtlich ist. Der in den Ankerwindungen induzierte Strom fliesst durch den Draht *a*, bei *b* teilt er sich, und zwar nimmt der eine Teil seinen Weg durch den Draht des Elektro-

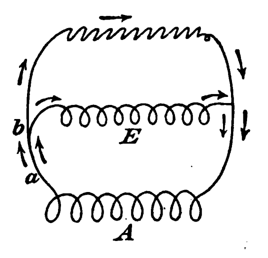


Fig. 71.

magnets (*E*), der andere durch die äussere Leitung. Wir haben es also hier mit einer Stromverzweigung zu thun.

Die Vorzüge der Nebenschlussmaschine, die in elektrischen Centralen, die Gleichstrom an die Consumenten abgeben, fast immer Anwendung findet, sind die folgenden:

1) Da die Stärke des Stromes, der durch die Schenkelwindungen des Elektromagnets fliesst, von dem Widerstande in *E* abhängt, so können wir, wenn wir in *E* einen veränderlichen Widerstand einschalten, die elektromotorische Kraft der Maschine innerhalb gewisser Grenzen regulieren. Schalten wir beispielsweise mehr Widerstand mit Hülfe eines Rheostats oder Regulierwiderstandes ein, so wird der Strom, der den Feldmagnet speist, schwächer (siehe Stromverzweigung), die elektromotorische Kraft also — die Tourenzahl hält man konstant — kleiner. (Siehe auch Akkumulatoren und elektrische Centralen.)

2) Die Maschine ist gegen Änderungen des äusseren Widerstandes nicht so empfindlich wie die Hauptstrommaschine. Wird z. B. der äussere Widerstand grösser, so wird nach den Gesetzen, die für Stromverzweigungen gelten, der Stromteil, der durch *E* fliesst, grösser, die elektromotorische Kraft wächst also.

3) Wird der Strom in der Nutzleitung unterbrochen, so wird, da dem Strome noch der Weg *E* zur Verfügung steht, die Maschine nicht stromlos, ihre elektromotorische Kraft wächst vielmehr, da die Feldmagnete stärker erregt werden. Die Maschine kann also, wenn in der Nutzleitung der Strom geschlossen wird, mit voller Kraft einsetzen.

4) Entsteht in der Nutzleitung ein Kurzschluss — berühren sich z. B. zwei Leitungsdrähte, so dass ein kleiner Widerstand eingeschaltet ist — so fliesst fast der ganze Strom in die Nutzleitung, so dass die elektromotorische Kraft der Maschine sofort sehr stark abnimmt und ausserdem die Magnetwickelung vor schädlicher Erhitzung bewahrt wird.

c) Bei den Compound- oder Verbundmaschinen hat der Elektromagnet eine doppelte Wickelung. Die eine Wickelung E_1 besteht aus vielen Windungen eines dünnen Drahtes, dieselben bilden gleichsam einen Nebenzweig des

Hauptdrahtes; die zweite Wickelung, die sich zugleich mit der ersten auf den Schenkeln des Feldmagnets befindet, — in der Fig. 72 sind die beiden Drähte der Übersicht wegen getrennt dargestellt — besteht aus verhältnismässig wenigen Windungen eines dickeren Drahtes (E_2). E_2 ist also ein Stück des Schliessungsbogens. Ist nun der äussere Widerstand, der von E_2 mit einbegriffen, kleiner als der in E_1, so fliesst der grössere Teil des Stromes durch E_2, der kleinere Teil durch E_1, und es bewirkt ersterer eine Verstärkung des Magnetismus. Ist aber der Widerstand im Schliessungsbogen grösser als derjenige in E_1, so fliesst der Hauptstrom durch E_1 und nur ein Teil durch E_2 und die äussere Leitung: jetzt verstärkt der durch E_1 fliessende Strom den Magnetismus. Die Compoundmaschine hat also innerhalb weiter Grenzen konstante elektromotorische Kraft resp. Klemmspannung.

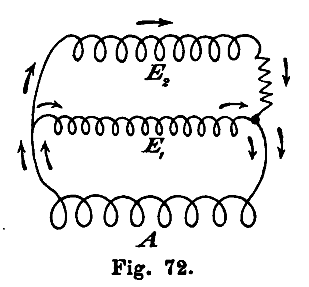


Fig. 72.

33. Der Trommelinduktor.

Bei den zuerst gebauten Grammeschen Maschinen wirkt der Magnetismus nur auf einen Teil des auf dem Ringe befindlichen Drahtes; es werden also die Ankerwindungen nur unvollständig ausgenutzt, indem ein Stück einer jeden Windung nur als leitende Verbindung zwischen den Drahtteilen dient, in denen Ströme induziert werden.

Diesem Übelstande wird fast gänzlich abgeholfen bei dem von Fr. v. Hefner-Alteneck, dem Oberingenieur der Firma Siemens & Halske, erfundenen Trommelinduktor, den wir kurz besprechen wollen. Statt eines Ringes benutzt v. Hefner-Alteneck einen Eisencylinder (Trommel), der um eine Achse drehbar ist. Die Wickelung besteht aus einzelnen Drahtgruppen, die so geordnet sind, dass je zwei zusammengehörige sich diametral gegenüberliegen. Die Drähte sind mit dem Stromsammler so verbunden, dass das Ganze als eine

ununterbrochene Leitung angesehen werden kann; die Wickelung ist so eingerichtet, dass die Ströme, die in zwei zusammengehörigen Drahtgruppen entstehen, sich addieren. Unsere Fig. 73 stellt einen Längsschnitt durch den Trommelinduktor

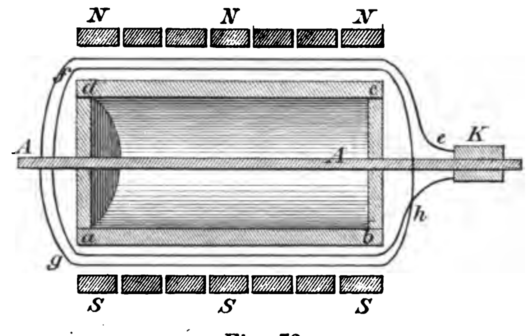


Fig. 73.

dar: *abcd* ist der Cylinder, *efgh* der aufgewickelte Draht, *A* die Achse und *K* der auf ihr befindliche Stromsammler (Kollektor). Die Magnete, die auf die Drahtwindungen des Induktors wirken, sind so geordnet, dass ihre Nordpole *N* nebeneinander liegen und ebenso die Südpole *S*, die Nordpole aber den Südpolen gegenüberstehen. Die Schenkel der Magnete sind unten so ausgebogen, dass sie den Umfang der Trommel bis zu zwei Dritteilen umfassen (Fig. 74). Man sieht, dass bei dieser Einrichtung die Wickelung zum grössten Teile dem induzierenden Einflusse der Pole ausgesetzt ist, dass also ein intensives magnetisches Feld gebildet wird.

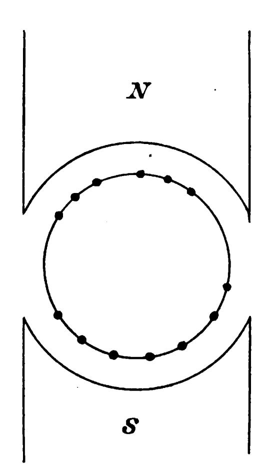


Fig. 74.

Eine Totalansicht eines Trommelinduktors mit Kommutator giebt Fig. 75. Man erkennt an dem Kommutator deutlich die Segmente und sieht, dass dieselben mit den einzelnen Abteilungen der Wickelung verbunden sind.



Fig. 75.

Die Verbindung zwischen der Kraftmaschine (Dampfmaschine, Gasmotor, Wassermotor) übernimmt meistens ein Riemen. Damit der Riemen, wenn er schlaff geworden ist, gespannt werden kann (auch während des Betriebes), wird die Dynamo auf Gleitschienen montiert, auf denen sie verschoben werden kann (Riemenspannvorrichtung). Grössere Dynamos werden mit der Dampfmaschine direkt gekuppelt (Dampfdynamos).

Je nachdem die Magnetpole sich ausserhalb oder innerhalb des Ankers befinden, nennt man die Dynamo Aussenpol- oder Innenpolmaschine.

Ist der Anker ringförmig (Grammescher Ring), so heisst die Dynamo Ringmaschine zum Unterschied zu den Trommelmaschinen, deren Anker eine Hefner'sche Trommel ist.

Unter dem Nutzeffekte oder dem elektrischen Effekte einer Dynamo versteht man den Effekt, den die Maschine in die Nutzleitung schickt. Er wird gemessen durch das Produkt aus der Klemmspannung und der Stromstärke. Beträgt z. B. die Klemmspannung einer Maschine 110 Volt und die Stromstärke 60 Ampère, so ist der Nutzeffekt 110.60 Watt = 6600 Watt. Diesem Nutzeffekte entsprechen ungefähr 9 Pferdekräfte $\left(\frac{6600}{736}\ \mathrm{PS}\right)$.

Zum Betriebe dieser Maschine sind aber mehr als 9 PS erforderlich wegen der Reibung, des Luftwiderstandes und des Energieverlustes, den der Strom in der Maschine selbst erleidet. Man nennt nun das Verhältnis zwischen dem Nutzeffekte und dem aufgewendeten Effekte das absolute Güteverhältnis der Maschine. Nehmen wir, um bei unserem Beispiele zu

bleiben, an, es seien 10 PS zum Betriebe der Dynamo erforderlich. Wir erhalten also

statt 7360 Watt, die aufgewendet wurden, 6600 Watt

„ 1 „ das „ wurde, $\frac{6600}{7360}$ „ = 0,9 W.

Also ist das Güteverhältnis der Maschine 0,9. Gewöhnlich giebt man das Güteverhältnis in Prozenten an. In unserem Beispiele würde man sagen: das Güteverhältnis beträgt 90 %. (Man nennt auch diese Zahl vielfach „Nutzeffekt“.)

Die folgenden Abbildungen von Dynamomaschinen sollen dazu dienen, den Inhalt der vorhergegangenen Betrachtungen noch klarer zu machen und die mechanische Anordnung der einzelnen Teile zu erläutern.

Eine kleine Dynamomaschine für Handbetrieb von Fein in Stuttgart ist in Fig. 76 abgebildet. Die Elektromagnet-

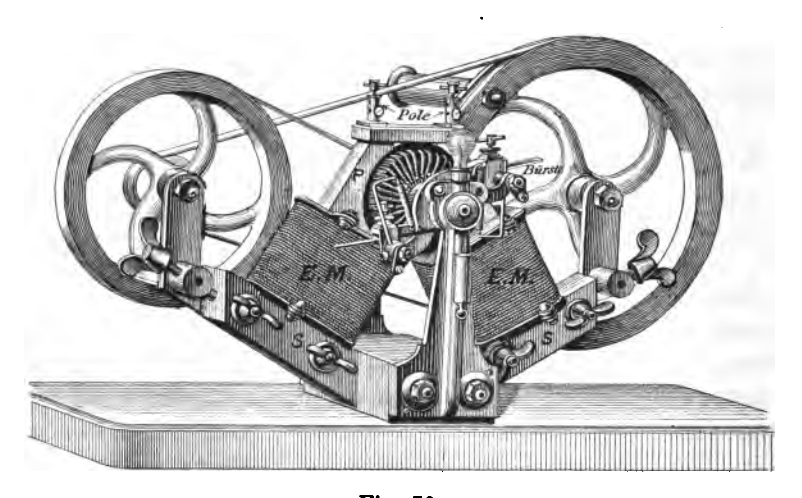


Fig. 76.

schenkel (Nordpol und Südpol) sind mit ***E. M.*** bezeichnet. Die Polschuhe ***P*** umfassen fast den ganzen Grammeschen Ring. Die Schenkel sind mit den Grundplatten ***S*** aus einem Stück gegossen.

Die folgende Figur (77) stellt eine vierpolige Aussenpolmaschine der Elektricitäts-Aktiengesellschaft vormals

Schuckert & Co. in Nürnberg dar. Der Induktor ist ein Trommelanker. Die vier Bürstenreihen*) liegen auf dem Kommutator. Die erste und die dritte Bürstenreihe sind leitend

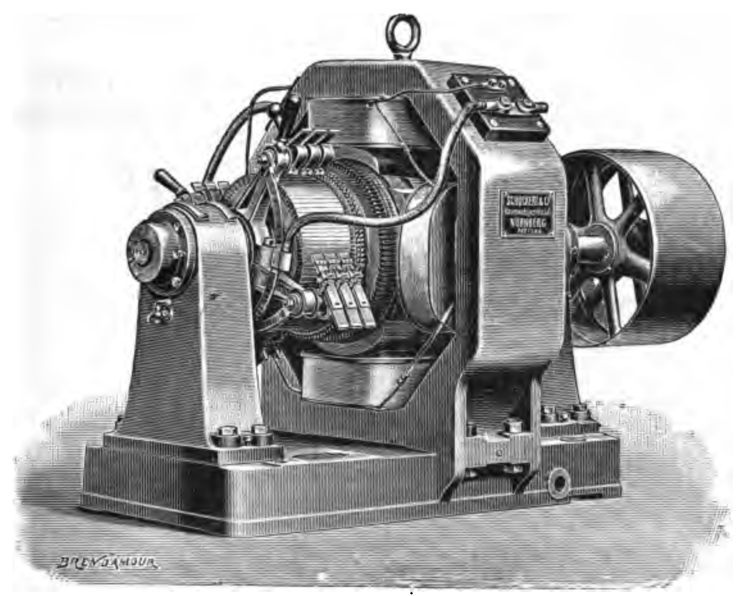


Fig. 77.

mit einander verbunden, ebenso die beiden anderen. Sämtliche Bürsten sind auf einem Ringe befestigt, der mittels eines Hebels gedreht werden kann. Während des Betriebes werden die Bürsten so eingestellt, dass funkenlose Stromabnahme erfolgt. Von den beiden dicken Kabeln führt das eine den Strom nach einer der grossen Klemmen hin (die Nutzleitung ist nicht gezeichnet), das andere von der zweiten Klemme fort. Das übrige ist aus der kleinen Skizze (Fig. 78)

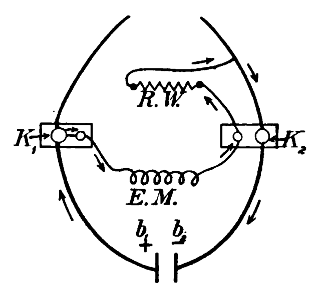


Fig. 78.

*) Man baut auch vierpolige Maschinen mit zwei Bürstenreihen, die 90° Abstand haben.

leicht zu ersehen: b_1, b_2 sind die Bürsten, K_1, K_2 die grossen Klemmen, ***E. M.*** ist die Elektromagnetwickelung, die im Nebenschluss liegt, ***R. W.*** endlich der Regulierwiderstand. (Die bekannte Schuckert'sche Flachringmaschine wird nicht mehr gebaut.)

Die Ansicht einer grossen Innenpolmaschine von Siemens & Halske Modell J 46/27 zeigt die Fig. 79. Sechs

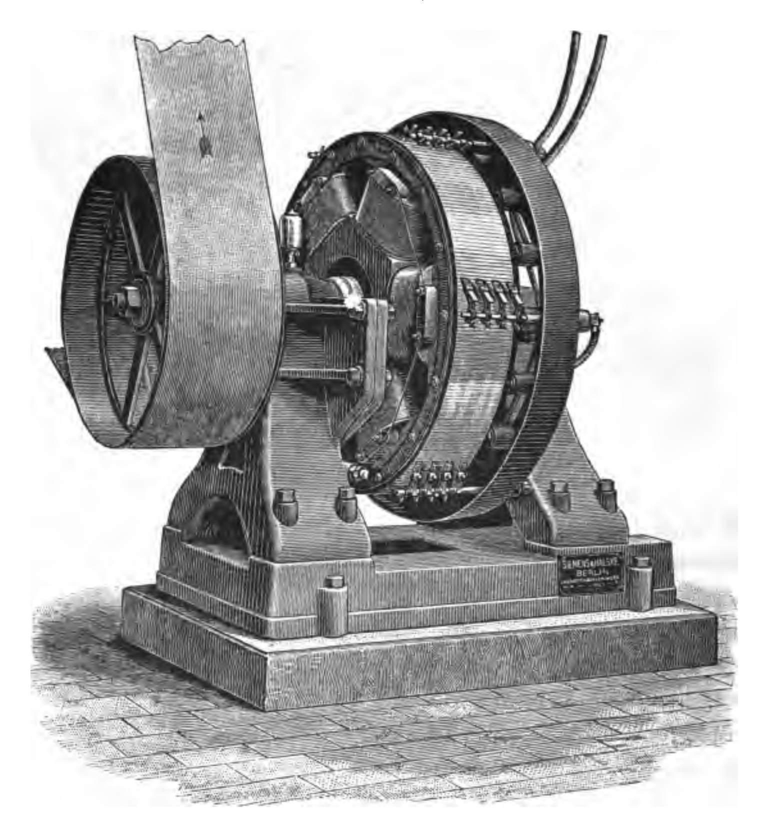


Fig. 79.

Pole wirken induzierend auf den Anker. Die Ströme werden durch sechs Bürstenreihen direkt von dem rotierenden Anker abgenommen; es fehlt also der Kommutator. Die normale Leistung dieser Maschine beträgt bei 350 Umdrehungen

in der Minute 65 000 Watt bei 110 Volt Klemmenspannung. Zum Betriebe sind 105 Pferdekräfte erforderlich.

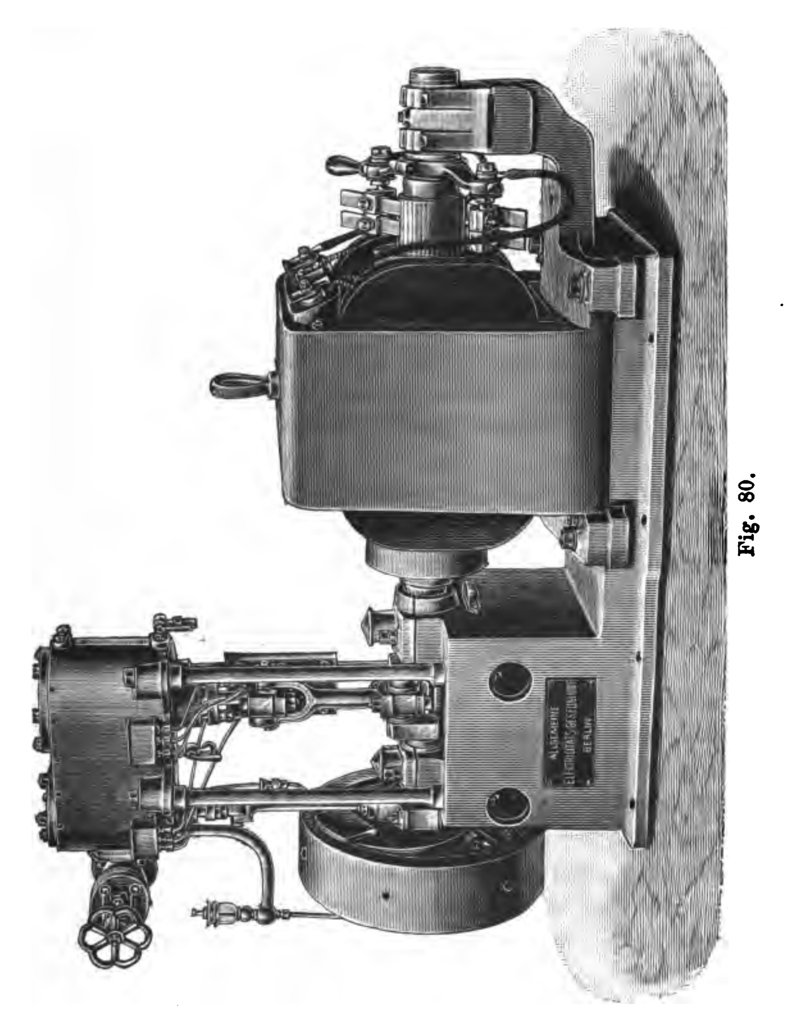


Fig. 80.

Endlich ist in Fig. 80 eine Dampfdynamo der Allgemeinen Elektricitäts-Gesellschaft, Berlin (Modell DD_{50}) dargestellt. Die eincylindrische Dampfmaschine überträgt ihre mechanische Energie direkt auf die Dynamo (Modell NG). Diese ist, wie man sieht, eine zweipolige Neben-

schlussmaschine. Die kleinste Maschine dieses Typus bedarf bei einer Spannung von 65 resp. 110 Volt und einer Stromstärke von 60 resp. 30 Ampère einer Kraft von 6,2 resp. 5,3 PS.

34. Gleichstrom-Elektromotoren.

Verbindet man die Klemmen einer Dynamomaschine mit den Polen einer kräftigen Stromquelle (einer Gleichstrommaschine oder einer Akkumulatorenbatterie), so gerät der Anker infolge der Wechselwirkung zwischen Stromleitern (den Windungen des Ankers) und Magnetpolen (die Elektromagnete der Dynamomaschine werden durch den hineingeleiteten Strom erregt) in Rotation. Jede Dynamo ist also eine umkehrbare Maschine, d. h. wir können sie benutzen, 1) um mechanische Energie in elektrische umzusetzen, 2) um elektrische Energie in mechanische Arbeit zu verwandeln (Elektromotor). Bei den Elektromotoren kehren alle die Typen wieder, die bei den Dynamomaschinen vorkommen. Im Princip sind die Elektromotoren nicht verschieden von den Dynamos, sie unterscheiden sich von ihnen nur durch die mechanische Anordnung der Teile, d. h. durch die Bauart.

Rotiert der Anker oder Induktor eines Elektromotors, so werden gerade so wie bei einer Dynamo in der Ankerwickelung elektrische Ströme erregt, es wird also in dem Motor eine elektromotorische Kraft ins Leben gerufen. Aus dem Princip von der Erhaltung der Kraft folgt schon, dass diese neue elektromotorische Kraft den Hauptstrom, d. h. den von der primären Maschine zugeführten Strom, bekämpft (elektromotorische Gegenkraft). Je grösser die Tourenzahl des Motors und je stärker sein magnetisches Feld ist, um so grösser ist die elektromotorische Gegenkraft. Jeder Motor hat das Bestreben, eine solche Tourenzahl anzunehmen, dass seine Gegenspannung der Spannung des primären Stromes — gemessen an den Klemmen des Motors — möglichst gleich kommt (ganz gleich kann sie nicht werden). Nun hat der Nebenschlussmotor — diese werden am meisten gebaut — ein fast kon-

stant bleibendes magnetisches Feld; daher ist er gegen Belastungsschwankungen fast gar nicht empfindlich, d. h. er läuft mit nahezu konstanter Geschwindigkeit (dies gilt für den Serienmotor nicht).

Die dem Elektromotor zugeführte Energie wird in Watt gemessen und erhalten durch Multiplikation der Klemmenspannung des Motors und der Stromstärke. Von der Grösse dieses Produktes hängt natürlich auch die mechanische Energie ab, die der Motor an Arbeitsmaschinen abgeben kann. Die Arbeit aber, die ein Motor zu leisten hat, ist bald grösser bald kleiner — dies trifft in den meisten Fällen zu —; daher muss man entweder den einen Faktor oder den anderen variieren können. Nimmt der Elektromotor seinen Strom aus der Leitung einer Centralstation, so lässt man ihn mit konstanter Spannung arbeiten und ändert die Stromstärke, indem man einen Regulierwiderstand einschaltet.

In dem Augenblick, in dem man einen Motor in den Stromkreis einschaltet, um ihn in Betrieb zu setzen, stürzt sich, da der Motor noch keine Arbeit leistet, oder anders ausgedrückt, da noch keine elektromotorische Gegenkraft vorhanden ist, der Strom mit grosser Wucht in den Motor (die Stromstärke ist sehr stark). Dies hat, wenn ausser dem Motor Lampen gleichzeitig von der Primärdynamo gespeist werden, ein plötzliches Sinken der Spannungsdifferenz an den Zuleitungsdrähten der Lampen (cf. Spannungsverlust) und daher eine momentane Abnahme der Leuchtkraft zur Folge. Um das zu vermeiden, bedient man sich eines sogenannten Anlasswiderstandes, den man, wenn der Motor in Betrieb gesetzt werden soll, langsam ausschaltet.

Die Leistung eines Elektromotors, dividiert durch den elektrischen Effekt, den man zugeführt hat (Produkt aus der Klemmenspannung des Motors und Stromstärke), nennt man den Wirkungsgrad der sekundären Maschine (des Elektromotors). Dieser ist um so günstiger, je grösser der Motor ist, wie die folgenden Beispiele zeigen:

Ein Motor von Siemens & Halske für 220 Volt Klemmspannung

von 1 PS verbraucht bei voller Belastung 1080 Watt, Wirkungsgrad $\frac{736}{1080} = 0{,}7$ oder 70 %

von 5 PS verbraucht bei voller Belastung 4500 Watt, Wirkungsgrad $\frac{5.736}{4500} = 0{,}81$ oder 81 %

von 9 PS verbraucht bei voller Belastung 7800 Watt, Wirkungsgrad $\frac{9.736}{7800} = 0{,}85$ oder 85 %.

Der Wirkungsgrad steigt bis zu 92 %.

Elftes Kapitel.

Wechselströme und Drehströme.

---

35. Bedeutung der Wechselströme für die Elektrotechnik.

Gleichströme hoher Spannung kann man in Dynamomaschinen nicht erzeugen, weil bei hochgespannten Gleichströmen an der Berührungsstelle zwischen Bürsten und Kommutator leicht der Davy'sche Lichtbogen entstehen kann (siehe S. 132). Nehmen wir als äusserste zulässige Spannung in Gleichstrommaschinen 2000 Volt an (über diese Spannung ist man wohl kaum hinausgegangen). Setzen wir nun den Fall, man wolle eine Wasserkraft für Licht- und Kraftzwecke an einem Orte ausnutzen, der 25 km von der Wasserkraft entfernt ist, und Gleichstrom von 2000 Volt Spannung in die Fernleitung schicken; die Drähte sollen so dick sein, dass der Energieverlust in der Leitung 10 % beträgt; der Effekt endlich, den die Dynamo in die Leitung schicken soll, sei 100 PS. Rechnen wir aus, wie viel der Leitungsdraht kosten würde:

1) 100 PS sind gleichwertig 100.736 Watt. Beträgt also die Klemmspannung der Maschine 2000 Volt, so muss die Stromstärke $\frac{100.736}{2000} = 36{,}8$ Ampère sein.

2) Der Spannungsverlust soll höchstens 200 Volt betragen. Der Spannungsverlust ist aber nach S. 54 gleich der Stromstärke $\times$ dem Widerstand in der Leitung (w):

$$\text{Also } 200 = 36{,}8 \,.\, w \text{ oder } w = \frac{200}{36{,}8}.$$

3) Die Länge der beiden Drähte ist gleich 50000 Meter. Nennen wir also den zu suchenden Querschnitt q, so ist, da allgemein

$$w = \frac{L}{55 \,.\, q},$$

$$\frac{200}{36{,}8} = \frac{50\,000}{55 \,.\, q}.$$

Man findet

$$q = \frac{50000 \,.\, 36{,}8}{55 \,.\, 200} = 167 \text{ qmm (abgerundet).}$$

Von einem Drahte dieses Querschnittes würde 1 Meter ca. 2,80 Mark kosten, die ganze Leitung ohne Masten, Isolatoren etc. und Montage etwa 140000 Mark. Aber gesetzt, man wollte diese verhältnismässig sehr hohe Summe für die Leitungsdrähte aufwenden, so fragt es sich: was machen wir mit dem Strome von 1800 Volt Spannung? Mit Rücksicht auf die Gefahren, die so hochgespannte Ströme im Gefolge haben, mit Rücksicht darauf, dass Lampen und Motoren höchstens 220 Volt verlangen, müssen wir den hochgespannten Strom transformieren, d. h. in Strom niedrigerer Spannung umwandeln. Dies lässt sich allerdings bewerkstelligen — aber nur mit grossem Verluste (wie wir später sehen werden).

Der Wechselstrom zeichnet sich dadurch vor dem Gleichstrome aus, dass man Wechselstrom hoher Spannung leichter erzeugen und ohne grosse Verluste transformieren kann.

36. Der einphasige Wechselstrom.

Solange der Anker einer Gleichstrommaschine in demselben Sinne gedreht wird, ist die Stromrichtung in der Leitung dieselbe, und solange die Maschine ihre Tourenzahl beibehält

und der äussere Widerstand sich nicht ändert, bleibt auch die Stromstärke dieselbe. Anders verhalten sich die Wechselströme: sowohl die Stromrichtung als auch die Stromstärke ändern sich in schnellem Wechsel. Das Verhalten der Wechselströme kann man bildlich darstellen durch eine Wellenlinie (Fig. 81). In einem gewissen Momente ist die elektromotorische

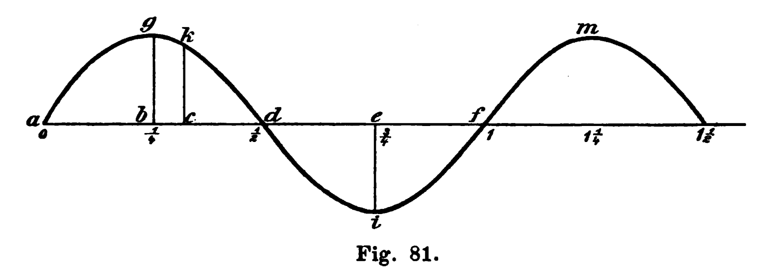


Fig. 81.

Kraft gleich Null (Punkt *a*), von da an wächst sie bis zu einem positiven Maximum (*bg*), nimmt wieder ab bis zum Nullwerte (Punkt *d*); jetzt ändert sich die Stromrichtung — wir sagen statt dessen: die elektromotorische Kraft oder die Stromstärke wird negativ — die elektromotorische Kraft wächst (oder vielmehr sinkt) bis zu einem negativen Maximum (*ei*), erreicht bald wieder den Wert Null etc.

Man nennt die Zeit, die dem Kurvenstück *agdif* oder dem Kurvenstück *gkdifm* entspricht, die Periode des Wechselstromes, die grösste Stromstärke die Amplitude (*bg*) und die Stromstärke zu einer gewissen Zeit dividiert durch die Amplitude die „Phase“ und sagt von dem Wechselstrome: er durchläuft eine Reihe von Phasen. Die Periode beträgt bei den meisten Maschinen $^1/_{50}$ Sekunde.

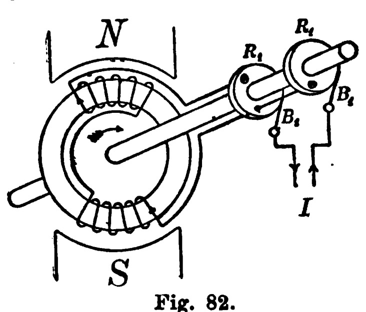


Fig. 82.

Eine schematische Darstellung einer Einphasenstrommaschine ist die Fig. 82. Zwischen den Polen *N* und *S* eines Magnets befindet sich ein Eisenring mit zwei hintereinandergeschalteten, aber in entgegen-

gesetztem Sinne aufgewickelten Spulen. Die freien Drahtenden sind mit zwei auf der Drehungsachse angebrachten Schleifringen R_1 verbunden. B_1 sind zwei federnde und bei der Rotation des Ringes auf R_1 schleifende Metallstreifen. Rotiert der Eisenring, so entstehen in den Spulen Ströme, die gleich gerichtet sind. Nach jeder halben Umdrehung kehrt sich die Stromrichtung um. Die Periode ist gleich der Zeit, in der der Ring eine Umdrehung macht.

Eine grosse Wechselstrommaschine von Schuckert & Co. ist in Fig. 83 abgebildet. Die Elektromagnete sind auf dem Radkranze, dem rotierenden Teile, so angeordnet, dass jeder Nordpol zwei Südpole als Nachbarn hat und umgekehrt. Die feststehende Armatur befindet sich innerhalb des die ganze Maschine umschliessenden Gehäuses. Die Elektromagnete werden durch Gleichstrom, der in einer besonderen Maschine erzeugt wird, gespeist. Da die Armatur ruht, so sind die Bürsten, die die Wechselströme abnehmen, nicht erforderlich. Die Anzahl der Elektromagnetpole ist 20 — 10 Nordpole und 10 Südpole. Mithin gehen bei jeder Umdrehung des Radkranzes 10 Nordpole an derselben Windung der Armatur vorbei. Soll also die Periode des Wechselstromes $^1/_{50}$ Sekunde betragen, so muss die Maschine in 1 Sekunde $\frac{50}{10}$ oder in 1 Minute 300 Umdrehungen machen.

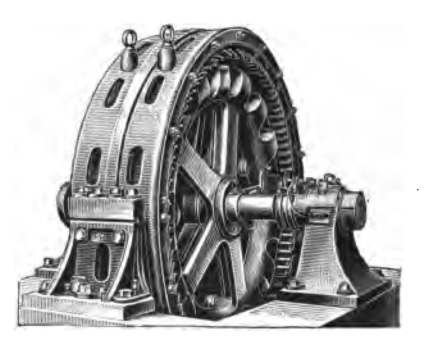


Fig. 83.

37. Der zweiphasige Wechselstrom.

Eine Zweiphasenstrommaschine ist in Fig. 83*) (S. 104) schematisiert. Auf dem Eisenringe befinden sich zwei Paar

*) Die Figuren 82 und 83 sind einer Abhandlung von Hans Görges, Oberingenieur von Siemens & Halske, entnommen: „Die Mehrphasenströme

Spulen, die um 90° von einander entfernt sind; die vier freien Enden sind mit den Schleifringen R_1 und R_2 verbunden. Bei der Rotation des Ringes erhalten wir also zwei von einander unabhängige Stromkreise. Wenn im ersten Stromkreise die Stromstärke ein positives Maximum hat, so ist sie im zweiten Null. Nach einer Viertelumdrehung ist die elektromotorische Kraft in dem zweiten Spulenpaare im Maximum, im ersten ist sie gleich Null. Dieses Verhalten der beiden Stromkreise zu einander kann man versinnlichen durch zwei Wellenlinien (Fig. 85), von denen die

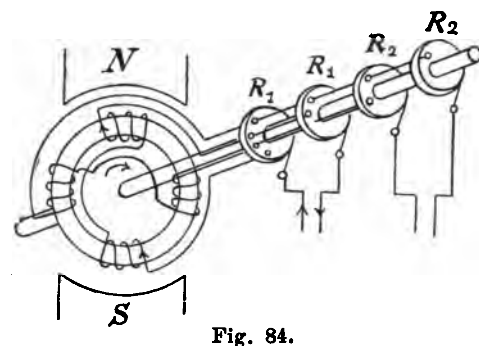


Fig. 84.

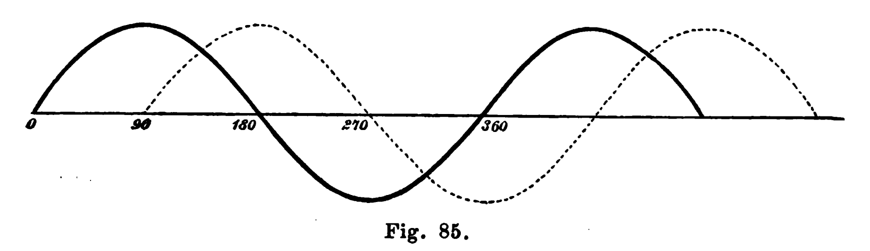


Fig. 85.

ausgezogene dem ersten, die punktierte dem zweiten Stromkreise entspricht. Während jeder Periode (Umdrehungszeit des Ringes) sind zweimal die elektromotorischen Kräfte einander gleich. Im Allgemeinen aber sind die Phasen verschieden. Man sagt von den beiden charakterisierten Stromkreisen: „sie sind in ihren Phasen gegeneinander verschoben“ oder: „sie haben eine Phasenverschiebung“. In unserem Falle beträgt die Phasenverschiebung 90°, weil der Ring eine Drehung von 90° ausführen muss, wenn die Phase im zweiten Strom-

und der Drehstrom. Eine gemeinfassliche Darstellung. Verlag von J. Springer in Berlin N.“

kreise dieselbe werden soll, wie die Phase im ersten Stromkreise vorher war.

Beim Zweiphasenstrom sind vier Leitungen erforderlich, man kann aber auch die beiden mittleren zu einer gemeinsamen Rückleitung, die stärker sein muss als die beiden äusseren Leitungen, vereinigen.

38. Der Drehstrom.

Denken wir uns den Ring Figur 84 mit drei Spulenpaaren versehen, so dass die Spulen einen Abstand von 60° von einander haben, und die sechs freien Drahtenden mit sechs Schleifringen verbunden, so entstehen bei der Umdrehung des Ringes drei von einander unabhängige Stromkreise, bei denen die Phasenverschiebung 60° beträgt. Treffen wir aber die Anordnung so, wie in Fig. 86 angedeutet ist, d. h. verbinden wir

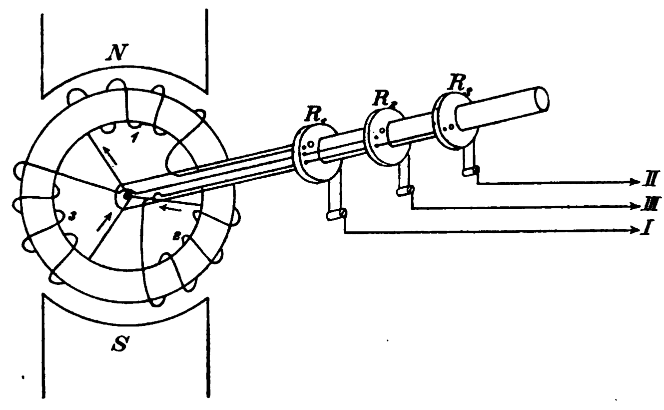


Fig. 86.

drei der freien Drahtenden kurz miteinander, so sind die Stromkreise abhängig von einander und zwar ist in jedem Momente $i_1 + i_2 + i_3 = o$, wenn i_1, i_2, i_3 die Stromstärken in den einzelnen Spulen resp. in den Leitungen I, II und III sind. Die Phasenverschiebung beträgt jetzt 120°. Die in der Maschine erzeugten Ströme nennt man „verkettetes Dreiphasenstromsystem" oder Drehstrom, weil man mit Hülfe eines solchen Systems ein sogenanntes Drehfeld erzeugen kann (siehe S. 107).

Was nun den Drehstrom vor allem wertvoll macht, ist der Umstand, dass nur drei Leitungen erforderlich sind. Um uns dies klar zu machen, wollen wir für einen Augenblick annehmen, die Elektricität sei eine ausserordentlich feine Flüssigkeit. Rotiert nun der Ring und kommt Spule 1 in die gezeichnete Lage, so fliesst durch die Leitung I ein Strom in einem gewissem Sinne, etwa von links nach rechts, in den Spulen 2 und 3 aber werden Ströme induziert, die in den Leitungen II und III von rechts nach links fliessen. Es saugt also gleichsam die Spule 1 Elektricität aus den Spulen 2 und 3 heraus. Dreht man den Ring um 60°, so fliessen die Ströme in den Leitungen I und III von der Maschine fort und die Summe durch die Leitung II zur Maschine zurück. Nach einer weiteren Drehung von 60° fliesst der Strom durch die Leitung III von der Maschine fort und in den Leitungen II und I nach der Maschine hin etc.

Charakteristisch ist bei dem Drehstrome, dass die Spannungsdifferenz zwischen den Drähten I und II gleich der „
„ „ „ „ I „ III „ „ „
„ „ „ „ II „ III ist.

Man teilt daher die Lampen in drei Gruppen ein und verteilt die Gruppen zwischen je zwei Leiter.

Rotiert bei einer Drehstrommaschine das Elektromagnetsystem, so sind Schleifringe und Bürsten zur Stromabnahme überflüssig, wohl aber sind dann Bürsten erforderlich, die den Elektromagneten den in einer Erregermaschine erzeugten Gleichstrom zuführen. Ob man die Maschine mit ruhender Wickelung oder mit ruhenden Elektromagneten baut, hängt von der Spannung ab.

39. Wechselstrom- und Drehstromelektromotoren.

Die Einphasenstrommotoren sind wegen der Mängel, die sie haben, nur wenig im Gebrauche. Man wendet eben einphasigen Wechselstrom nur da an, wo das Lichtbedürfnis überwiegt. Wir können daher in diesem kleinen Buche von einer Beschreibung der Einphasenstrommotoren Abstand nehmen.

Rotierende Magnetpole in einem ruhenden Ringe. Befindet sich auf einem Eisenringe ein Paar Spulen, und leiten wir durch die Spulen Gleichstrom, so entstehen in dem Ringe ein Nordpol und ein Südpol, die ihre Plätze beibehalten. Schicken wir aber Wechselströme durch die Drahtwindungen, so wechseln die Pole jedesmal, wenn sich die Stromrichtung ändert, ihre Plätze; es entsteht ein sogenanntes pulsierendes Magnetfeld.

Versehen wir den Ring mit zwei Paar Spulen (Fig. 87) und verbinden wir die vier freien Drahtenden mit den Schleiffedern einer Zweiphasenstrommaschine (Fig. 84), so machen die Pole während jeder Periode des Wechselstromes einen Umlauf in dem Ringe (rotierendes Feld oder Drehfeld). Wir wollen, um dies klar

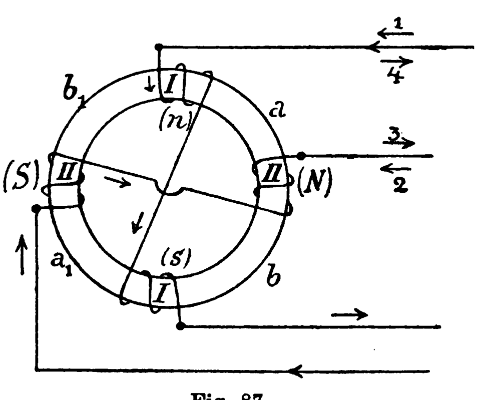


Fig. 87.

zu machen, von dem Momente ausgehen, in dem die Stromstärke im ersten Stromkreise ein positives Maximum hat und im zweiten gleich Null ist. 1) Fliesst der Strom in der Richtung des Pfeiles 1, so entsteht bei *N* ein Nordpol, bei *S* ein Südpol. 2) Die Stromstärke im ersten Kreise nimmt ab, im zweiten wächst sie (Pfeile 1 und 2). Der erste Strom sucht in *N*, der zweite in *s* einen Nordpol zu induzieren. Der resultierende Nordpol liegt also zwischen *N* und *s*, etwa bei *b*. Da nun die Stromstärken sich nicht sprungweise ändern, sondern kontinuierlich, so ändert auch der Nordpol nicht sprungweise seine Lage; er wandert also während der Zeit, die zwischen 1) und 2) liegt, von *N* bis *b*. 3) Stromstärke im ersten Kreise Null, im zweiten ein positives Maximum (Pfeil 2): der Nordpol liegt bei *s*. 4) Stromstärke im ersten Kreise negativ, im zweiten positiv. Jetzt sucht der

erste Strom in S, der zweite in s einen Nordpol zu erregen: der resultierende Nordpol liegt also zwischen s und S etc.

Der resultierende Südpol liegt jedesmal dem resultierenden Nordpole diametral gegenüber.

Befindet sich also innerhalb des Ringes ein Magnet, der sich, wenn der Ring horizontal liegt, um eine vertikale Achse drehen kann, so rotiert der Magnet, weil seine Pole von den Ringpolen angezogen werden (synchrone Motoren).

Hat der Ring drei Spulen, so können wir wieder drei Enden der Drähte kurz miteinander verbinden (siehe Fig. 86). Denken wir uns nun die drei noch freien Drahtenden mit den drei Leitungen, die von einer Drehstrommaschine ausgehen, verbunden, so entsteht, wenn die Drehstrommaschine im Betriebe ist, in dem Ringe ebenfalls ein Drehfeld, d. h. wir erhalten Magnetpole, die in dem Ringe rotieren, und zwar laufen auch jetzt die Pole während jeder Periode einmal in dem Ringe herum.

Asynchrone Motoren. Befindet sich innerhalb oder ausserhalb des Ringes, in dem das rotierende magnetische Feld erregt wird, ein zweiter concentrischer Ring, der mit in sich geschlossenen Drahtwindungen versehen ist (Fig. 88), so induzieren die rotierenden Pole in den Drahtwindungen des Ringes r elektrische Ströme. Nun verhält sich ein Stromkreis, wie wir gesehen haben, Magnetpolen gegenüber gerade so wie ein Magnet, der senkrecht auf der Windungsebene steht. Die rotierenden Magnetpole üben daher auf die Windungen des Läufers (Ring r) tangential gerichtete Kräfte aus. Infolge dessen gerät der Ring r in rotierende Bewegung. Die Bewegung des Läufers wird auf eine Achse und von dieser auf eine Arbeitsmaschine übertragen. Würde die

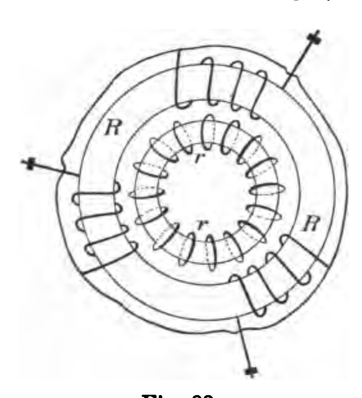


Fig. 88.

Rotation des Ringes *r* mit derselben Geschwindigkeit erfolgen, mit der die Pole in dem Ringe *R* herumlaufen, so würde sich die Anzahl der die Windungen durchsetzenden Kraftlinien nicht ändern, und mithin würden in den Windungen keine Ströme erregt, der Motor also keine Zugkraft haben. Läuft aber der innere Ring etwas langsamer als die Pole, so laufen die Pole an den Drahtwindungen vorbei und induzieren Ströme; die Zugkraft des Motors wächst. „Läuft nun der Motor zunächst mit geringer Kraft, also mit geringer Leistung, so bleibt seine Geschwindigkeit nur um wenige Touren hinter der der Pole zurück. Wird er belastet, so sinkt seine Geschwindigkeit so weit, bis er die erforderliche Zugkraft erreicht hat. Die Geschwindigkeitsänderung ist in der Praxis sehr gering, etwa 2 bis 7%, je nach der Grösse des Motors, wenn er einmal leer und dann vollbelastet läuft.“ (H. Görges: Ueber die Verwendung des Drehstromes zur Lieferung von Licht und Kraft.)

Aus dem Vorigen ergiebt sich, dass man Drehstromelektromotoren ohne Schleifringe und Bürsten bauen kann. Man muss bei solchen Motoren allerdings von der Einschaltung eines Anlasswiderstandes absehen. Würde man nämlich einen Widerstand in die Stromzuleitungen legen, so würde ein schwaches magnetisches Drehfeld beim Anlassen erzeugt, der Motor würde also seine Zugkraft beim Anlaufen verlieren. Die Übelstände, die das Fehlen eines Anlassers im Gefolge hat, muss man mit in den Kauf nehmen.

Einen Drehstrom-Elektromotor der Allgemeinen Elektricitäts-Gesellschaft, Berlin, zeigt uns die Fig. 89 (S. 110) (Modell DR.). Wie man sieht, fehlen Schleifringe und Bürsten. Das abgebildete Modell baut die genannte Gesellschaft mit Leistungen von $^1/_6$, $^1/_2$, etc. bis 15 PS; auf besondere Bestellung werden die DR-Motoren mit Schleifringen versehen.

Grössere Drehstrom-Elektromotoren werden meistens so gebaut, dass der rotierende Teil drei Schleifringe erhält. Den Anlasswiderstand schaltet man dann in die Wickelung des rotierenden Teiles ein.



Fig. 89.

Zwölftes Kapitel.

Anwendungen des elektrischen Stromes.

40. Die elektrische Telegraphie.

Zwei Umstände sind es, die die Elektricität für die Telegraphie besonders geeignet machen, nämlich die sehr grosse Geschwindigkeit, mit der sie sich durch Drähte bewegt und die Möglichkeit, sie einen vorgeschriebenen Weg durchlaufen zu lassen. Die grosse Fortpflanzungsgeschwindigkeit hat die Elektricität mit dem Lichte gemeinsam; wir haben es aber nicht in unserer Gewalt, die Lichtstrahlen einen längeren, vorgeschriebenen Weg durcheilen zu lassen.

Der erste elektrische Telegraph ist im Jahre 1833 von Gauss und Weber in Göttingen hergestellt worden; die Leitungs-

drähte verbanden das physikalische Kabinett mit der Sternwarte. Im Jahre 1838 zeigte Steinheil, dass nur ein Leitungsdraht zwischen den beiden Stationen, die telegraphisch zu verbinden sind, nötig ist.

In der That: Sind $+P$ und $-P$ in der Fig. 90 die Pole eines galvanischen Elementes, so hat, wie früher gezeigt worden, die positive Polplatte ein höheres und die negative ein niedrigeres Potential als die Erde. Versenkt man daher in feuchtes Erdreich, am besten in das Grundwasser, zwei Metallplatten A und B, die sogenannten Erdplatten, die mit $+P$ und $-P$ verbunden sind, so strömt Elektricität von $+P$ nach A und von B nach $-P$ hin. Da aber A die von $+P$ strömende Elektricität an die leitende Erde (Feuchtigkeit) abgiebt, also das Potential Null beibehält, B aber fortwährend Elektricität mitgeteilt wird, so ist der Erfolg derselbe, wie wenn A und B sich berührten, und die Elektricität des Elementes von $+P$ über A und B nach $-P$ hinströmte (Erdleitungen).

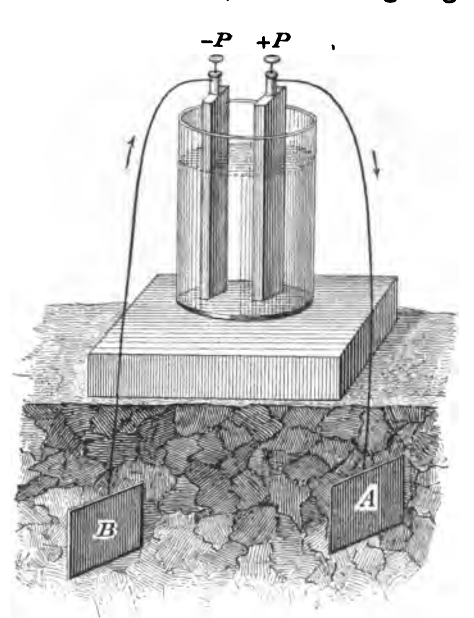


Fig. 90.

Der Amerikaner Morse war der Erste, der Elektromagnete zur Telegraphie benutzte. Der von ihm erfundene Schreibtelegraph war früher fast ausschliesslich und ist auch jetzt noch vielfach im Gebrauch. Die Hauptteile dieses Apparates sind in der Fig. 91 (S. 112) abgebildet. Dicht über einem Elektromagnet EM schwebt ein Eisenstab, der an einem um die Achse P drehbaren Hebel H befestigt ist. Bei S trägt

der Hebel einen Stift. Schickt man einen elektrischen Strom durch die Windungen des Elektromagnets, so wird der Anker angezogen, und der Hebel dreht sich um *P*. Dadurch wird der linke Hebelarm gehoben und der Stift gegen einen Papierstreifen gedrückt, der durch ein Uhrwerk mit gleichförmiger Geschwindigkeit zwischen zwei sich drehenden Rollen hindurchgezogen wird. Sobald der Strom unterbrochen wird, verliert der Elektromagnet den grössten Teil seines Magnetismus; der Anker wird dann durch eine Feder *F* in die Höhe gehoben, der Stift also von dem Papierstreifen entfernt. Es entsteht auf dem Papierstreifen ein Punkt oder eine Linie, je nach der Zeitlänge, die zwischen dem Schliessen und Öffnen des Stromes liegt. Aus Punkten und Strichen ist das Alphabet zusammengesetzt, z. B.:

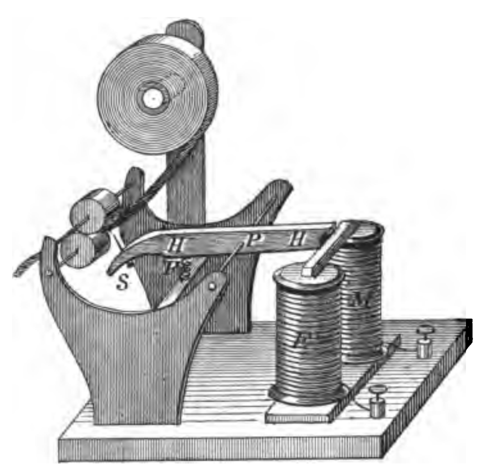


Fig. 91.

a = • —, e = •, i = • •, n = — •, m = — —

Die Zeichen, die der Morse'sche Schreibapparat giebt, sind nicht deutlich genug. Man suchte daher den Apparat zu verbessern. Die Aufgabe wurde gelöst durch die sogenannten Farbschreiber. Bei diesen wird der Papierstreifen durch die Spitze des Schreibhebels gegen den mit Farbe (öliger Tinte) angefeuchteten Umfang eines Rades gedrückt.

Zum Öffnen und Schliessen des Stromes bedient man sich des sogenannten Schlüssels oder Tasters (Fig. 92): *a*, *b*, *c* sind Messingsäulchen, *def* ist ein S-förmig gebogener Metallhebel, der bei *e* und *f* Warzen trägt. In der Ruhelage drückt die Feder *F* den linken Hebelarm in die Höhe; es liegt dann *f* auf *c*. Drückt man aber auf den Holzknopf *d*, so entfernt

sich *f* von *c*, und *e* berührt das Säulchen *b*. Jetzt fliesst der Strom von dem positiven Pole der Batterie nach *b*, durch *e* nach *a*, durch den Leitungsdraht nach dem Schreibtelegraph ***MS***

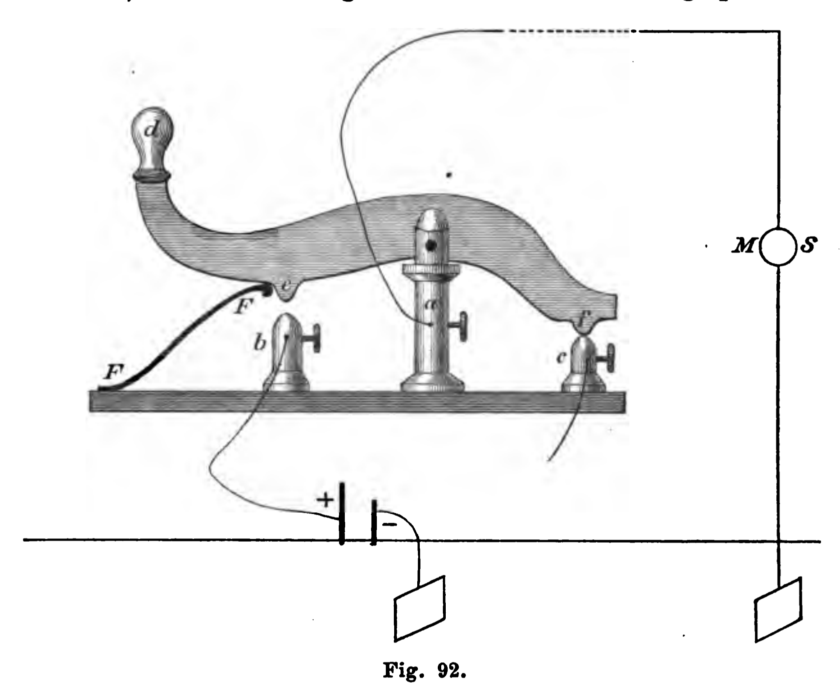


Fig. 92.

auf der Empfangstation und aus diesem in die Erde. Der negative Pol ist direkt ableitend mit der Erde verbunden.

Fig. 93 (S. 114) stellt zwei telegraphisch mit einander verbundene Stationen dar. Von den Schreibapparaten sind nur die Elektromagnete M_1 und M_2 gezeichnet. Auf der Station I hat der Telegraphist den Schlüssel niedergedrückt. Verfolgt man die numerierten Pfeile, so sieht man, dass der Strom der Aufgabestation I durch den Schreibapparat der Empfangsstation II fliesst.

Bei längeren Telegraphenleitungen wird der Strom, falls nicht eine sehr starke Batterie benutzt wird, infolge des Widerstandes, den er im Leitungsdrahte zu überwinden hat, so sehr geschwächt, dass er nicht mehr imstande ist, den Elektro-

magnet des Schreibapparates stark genug zu erregen. Es befinden sich daher auf jeder Station zwei Batterien, die Linienbatterie und die Lokalbatterie. Der Strom der ersteren

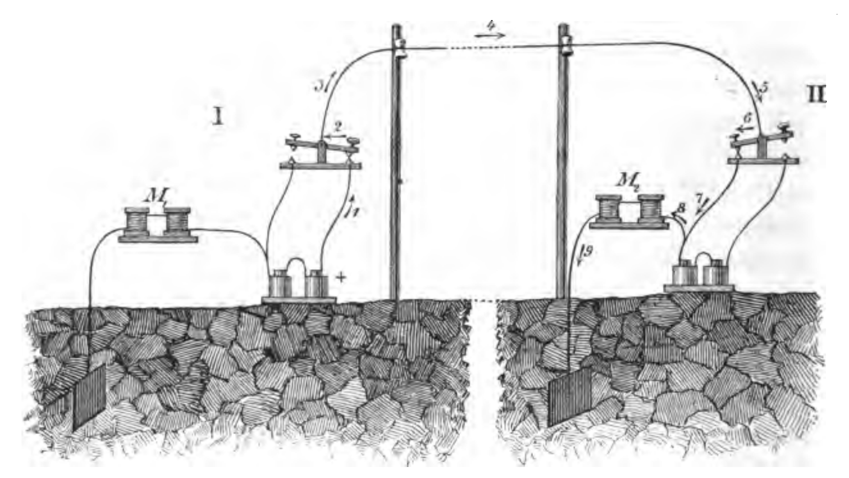


Fig. 93.

durchläuft den Telegraphendraht, gelangt zur Empfangsstation und durchfliesst dort das sogenannte Relais, dessen Einrichtung man aus der Fig. 94 ersehen kann. Fliesst nun der

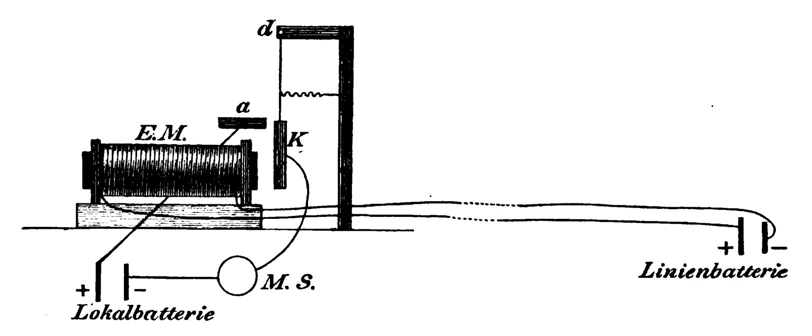


Fig. 94.

Linienbatteriestrom durch die Windungen des Relais-Elektromagneten *E. M.*, so zieht dieser den an dem um *d* drehbaren Hebel befestigten weichen Eisenkern *K* an; hierdurch wird, wie man ohne weiteres aus der schematischen Figur ersieht, der

Strom der Lokalbatterie geschlossen. Unterbricht der Telegraphist auf der Aufgabestation den Strom der Linienbatterie, so wird der Relaisanker durch eine Feder von *a* weggezogen, so dass der Strom der Lokalbatterie unterbrochen ist.

Der Morse'sche Schreibtelegraph wird in neuerer Zeit durch den Drucktelegraphen verdrängt, der die Depesche in lateinischen Lettern geschrieben liefert. Die Einrichtung dieses Apparates ist aber so compliciert, dass wir von einer Beschreibung absehen müssen. Es sei nur erwähnt, dass der Schlüssel ersetzt ist durch einen Apparat, der wie ein Klavier eine Art Klaviatur mit Tasten hat (jeder Taste entspricht ein Buchstabe), und dass auf der Empfangsstation ein Rad (Typenrad), dessen Umfang die Buchstaben aufweist, sich so lange dreht, bis der Buchstabe, dessen Taste auf der Aufgabestation angeschlagen worden ist, dem Papierstreifen gegenüber steht.

Die Telegraphie ohne Draht oder die Funkentelegraphie behandeln wir in einem späteren Abschnitte (siehe S. 151).

41. Die elektrische Nebenuhr oder das elektrische Zeigerwerk

sieht man in grösseren Städten auf Bahnhöfen, Plätzen etc. sehr häufig. Wir beschränken uns auf die Beschreibung der einfachsten Konstruktion: An einer Normaluhr, etwa einer gutgehenden Pendeluhr, ist eine Vorrichtung angebracht, durch welche ein elektrischer Strom in jeder Minute einmal geschlossen wird. Dies kann man etwa in der Weise erreichen: Ein Rädchen (Fig. 95), an dem eine Feder befestigt ist, werde durch das Räderwerk der Normaluhr in jeder Minute einmal umgedreht. Unterhalb desselben sei eine zweite ruhende Feder *F* so angebracht, dass die Radfeder mit ihr Kontakt erhalten kann. Ist nun die Achse des Rädchens durch einen Draht mit dem elektrischen Zeigerwerk *Z*, das gleich be-

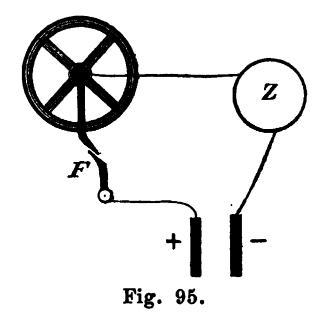


Fig. 95.

schrieben werden soll, dieses mit dem einen Pole einer Batterie und *F* mit dem anderen Pole verbunden, so wird der Strom in jeder Minute einmal für eine kurze Zeit geschlossen.

Der Hauptbestandteil des elektrischen Zeigerwerks ist ein Elektromagnet E. M. (Fig. 96). Gegenüber dem einen Pole *P* befindet sich der Eisenanker *A*, der unten das Stäbchen *s* trägt. Fliesst nun ein elektrischer Strom durch die Windungen des Elektromagnets, so bewegt sich das Stäbchen *s* nach rechts und sein Haken greift in die folgende Lücke des Zahnrades *Z* ein. Wird der Strom unterbrochen, so zieht die Feder *f* das Stäbchen zurück. Hat das Rad *Z* 60 Zähne und ist die Einrichtung so getroffen, dass es bei jeder Hin- und Herbewegung des Ankers um einen Zahn gedreht wird, so erfolgt eine ganze Umdrehung des Rades in einer Stunde (der Strom wird in jeder Stunde 60mal geschlossen und geöffnet). Die Bewegung des Zahnrades wird auf die Uhrzeiger übertragen. Der Sperrhaken *b* verhindert eine rückgängige Bewegung des Zahnrades.

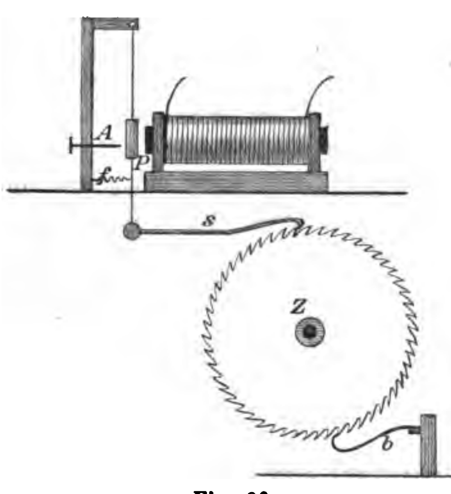


Fig. 96.

42. Die elektrische Klingel.

In unserer schematischen Darstellung der elektrischen Klingel mit Selbstunterbrechung oder der Rasselklingel ist *E* (Fig. 97) der Elektromagnet, *A* der Anker mit dem Drehungspunkte *D*, *s U* die Unterbrechungsvorrichtung, *G* die Glocke, *F* eine Feder, die von unten nach oben wirkt, *K* endlich der Druckknopf. Das Innere des Druck-

knopfes zeigt Fig. 98: *A* und *B* sind zwei starke Federn aus Neusilber; der Drücker *D* ist aus einem isolierenden Stoffe (Horn) angefertigt, damit der elektrische Strom nicht, wenn man *D* mit dem Finger berührt, abgeleitet werde. Kontakt findet zwischen *A* und *B* nur dann statt, wenn ein Druck auf *D* ausgeübt wird. Den Federn *A* und *B* giebt man meist die Gestalt einer Spirale. Das Ganze ist in eine Holzkapsel eingeschlossen.

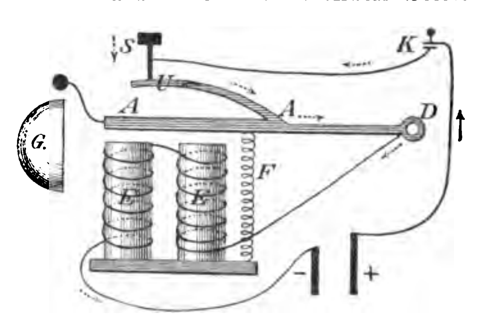


Fig. 97.

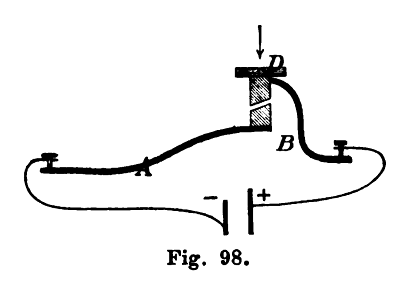


Fig. 98.

Drückt man auf den Knopf *K* (Fig. 97), so wird die Stromunterbrechung aufgehoben: der Strom fliesst dann so, wie es die punktierten Pfeile andeuten, also von *K* nach *S*, *A*, *D*, durch die Windungen des Elektromagnets zur Batterie zurück. Da nun durch den Strom der Magnetismus in *E* erregt wird, so wird der Anker *A* nach unten gezogen; infolge dessen schlägt der Klöppel, der durch einen federnden Metallstreifen mit *A* verbunden ist, gegen die Glocke. Bewegt sich aber *A* nach unten, so wird die Berührung zwischen *S* und *U* aufgehoben und daher der Strom, der ja seinen Weg über *S* nach *U* zu nehmen gezwungen ist, unterbrochen. *E* verliert dann seinen Magnetismus, die Feder hebt den Anker in die Höhe, und das Spiel wiederholt sich in schneller Aufeinanderfolge.

43. Das Telephon.

Das Bell'sche Telephon ist eine der genialsten Erfindungen, da das Princip desselben von überraschender Einfachheit ist.

Bevor wir auf die Beschreibung desselben eingehen, wollen wir einige Bemerkungen, die zum besseren Verständnis beitragen werden, vorausschicken.

1) Befindet sich ganz dicht bei dem einen Pole eines Magnets eine sehr dünne Eisenplatte, eine Eisenmembrane *PP'* (Fig. 99), die am Rande fest eingeklemmt ist, so wird sich die *N* gegenüberliegende Stelle der Platte, wenn der Magnetismus des Stabes auf irgend eine Weise verstärkt wird, etwas nach rechts hin bewegen, wird aber der Magnetismus geschwächt, so erfolgt die Bewegung der Membran nach links. Verstärkt und schwächt man also den Magnetismus in Intervallen, die schnell aufeinanderfolgen, so gerät die Membran in Schwingungen.

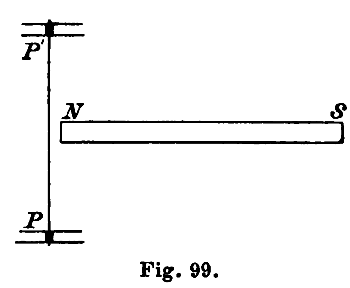


Fig. 99.

2) Hat man an den einen Pol eines Magnetstabes ein Eisenstück angehängt, so ist der nunmehr noch freie Magnetismus, da ein Teil der magnetischen Kraft Beschäftigung hat, schwächer als anfangs. Dasselbe gilt, wenn man dem einen Pole Eisen n ä h e r t. Nun befindet sich in Fig. 99 die dünne Eisenscheibe *PP'* in der Nähe des Magnets *NS*. Daher hat derselbe nicht seine volle Stärke, d. h. die Stärke, die er hatte, als *PP'* nicht da war. Bewegt sich ferner die Mitte von *PP'* nach *N* hin, so wird der Pol *N* noch weiter geschwächt; bewegt sich aber *PP'* nach links, so wächst der Magnetismus. Schwingt also *PP'*, so schwankt die magnetische Kraft innerhalb zweier Grenzen.

3) Beim Singen, Sprechen etc. wird die Luft in Schwingungen versetzt, diese Schwingungen pflanzen sich, da die Luft elastisch und sehr leicht beweglich ist, auf grössere Entfernungen hin fort. Gelangen die Luftschwingungen in unser Ohr, so erregen sie dort Nerven: der Nervenreiz pflanzt sich zum Gehirn fort und wird dort als Schall oder Ton empfunden. — Die Schwingungen der Körper, z. B. einer Violinsaite, erzeugen Schwingungen der umgebenden Luft. Umgekehrt können

Schwingungen der Luft Schwingungen in Körpern hervorrufen. (Wenn man von zwei gleich gestimmten Stimmgabeln die eine zum Tönen bringt und die andere auf einen Resonanzboden stellt, so tönt diese letztere bald mit.) Schwingt also PP' mit hinreichender Geschwindigkeit, so wird die die Scheibe umgebende Luft in Schwingungen versetzt, und ein in der Nähe von PP' befindliches Ohr wird einen Schall wahrnehmen.

4) Befindet sich ein Magnetpol im Inneren einer Drahtspirale (Solenoid), so entstehen elektrische Ströme von entgegengesetzter Richtung in den Windungen, wenn der Magnetismus des Stabes geschwächt oder verstärkt wird (s. S. 36).

5) Es sei daran erinnert, dass, wenn man auf einen Stab weichen Eisens einen Draht wickelt und durch den Draht einen Strom schickt, der Eisenstab magnetisch wird. Nimmt man statt des Eisenstabes einen Magnetstab, so wird der schon vorhandene Magnetismus desselben verstärkt oder geschwächt, je nach der Richtung, in der der Strom den Draht durchfliesst. Fliesst der Strom so, dass das Südende des Stabes, dem Beschauer zugewandt, umflossen wird in dem Sinne, in dem sich der Uhrzeiger dreht (von links nach rechts), so wächst die magnetische Kraft des Stabes, im anderen Falle wird sie geschwächt.

In der Fig. 100 seien NS und $N_1 S_1$ zwei Magnetstäbe, PP' kreisrunde papierdünne Eisenscheiben, die am Rande ein-

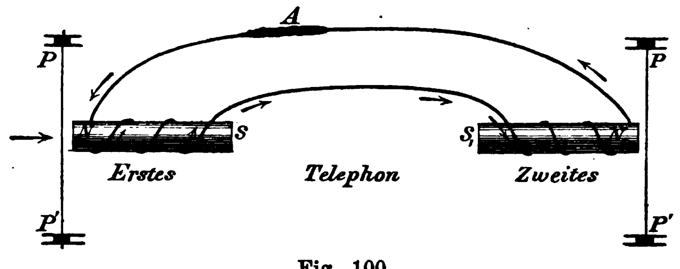


Fig. 100.

geklemmt sind und sich in unmittelbarer Nähe der Nordpole N und N_1 befinden. Ein langer, isolierter Draht werde auf

die Magnetstäbe so gewickelt, wie es aus der Fig. 100 ersichtlich ist (die Enden sind bei *A* zusammengelötet). Übt man nun gegen die linke Eisenscheibe einen schwachen Stoss aus, so wird der Magnetismus des Stabes geschwächt (2) und infolge dessen in den Windungen des Drahtes ein elektrischer Strom erregt (4), der sich so, wie es die Pfeile zeigen, durch den Draht ergiesst. Wie man aus der Fig. 100 ersehen kann, umfliesst dieser Strom den Südpol S_1 von links nach rechts, also in dem Sinne, in dem sich der Uhrzeiger dreht. Folglich wird der Magnetismus von $N_1 S_1$ verstärkt (5) und die Platte PP' (rechts) angezogen (1). Entfernt sich aber die linke Scheibe von N, so wird ein Strom induziert, der mit dem vorigen entgegengesetzte Richtung hat. Da dieser Strom den Magnetismus von $N_1 S_1$ schwächt, so entfernt sich die rechte Platte von dem Nordpole N_1. Jede Bewegung von PP' links hat also eine entsprechende Bewegung von PP' rechts zur Folge.

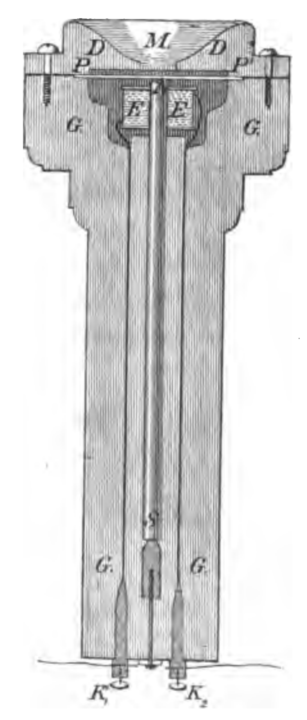


Fig. 101.

Spricht man nun gegen die eine Platte, so wird dieselbe durch die Stösse, welche die schwingende Luft gegen sie ausübt, in Schwingungen versetzt. Jeder Hin- und Herbewegung dieser Scheibe, d. h. jeder Schwingung, entsprechen zwei elektrische Ströme und daher zwei Bewegungen (eine Schwingung) der anderen Scheibe. Die Platte rechts macht also gerade so viele Schwingungen wie die Platte links.

Fig. 101 stellt das Telephon im Längsschnitte dar: *G* ist ein hölzernes Gehäuse, in dem sich der Magnetstab *NS* befindet. Das eine Ende desselben ist von einer Drahtspirale *E*, die aus vielen Windungen eines dünnen Drahtes besteht, umgeben. Die Enden des Drahtes sind mit den Klemm-

schrauben K_1 und K_2 fest verbunden. Dadurch, dass der Deckel D auf das Gehäuse fest aufgeschraubt ist, wird die dünne Eisenscheibe PP' am Rande eingeklemmt. Wie man sieht, hat der Deckel D eine trichterförmige Vertiefung M, das Mundstück.

Bei grösseren Entfernungen kann das Telephon zum Sprechen nicht mehr benutzt werden, weil die in demselben induzierten, schon an und für sich schwachen Ströme durch den Leitungswiderstand in den langen Verbindungsdrähten zu sehr geschwächt werden. Man muss dann das Mikrophon zu Hülfe nehmen.

44. Das Mikrophon von Hughes.

Um das Princip des Mikrophons klar zu legen, kann man folgenden Versuch anstellen. Auf einen Resonanzboden oder ein Kästchen A (Fig. 102) lege man zwei die Elektricität leitende Stäbchen s_1 und s_2 (Nägel, Schlüssel — am besten eignen sich Stäbchen von Retortenkohle) und quer über dieselben ein drittes Stäbchen s_3. Verbindet man dann die Pole eines galvanischen Elementes mit s_1 und s_2 und schaltet in den Schliessungsbogen ein Galvanoskop G ein, so wird die Nadel desselben abgelenkt. Berührt man nun, nachdem die Nadel zur Ruhe gekommen ist, das Kästchen, so bewegt sich die Magnetnadel hin und her. Es gerät nämlich der Resonanzboden in Schwingungen, und infolge dessen wird der Kontakt zwischen s_3 und den beiden anderen Stäbchen bald inniger bald loser. Dies kann man sich so klar machen: die Bewegung des Resonanzbodens wird auf die Stäbchen übertragen; s_3 wird an dem einen oder anderen Ende den Kontakt mit s_1 oder s_2 für kurze Zeit verlieren und eine dünne Luftschicht sich zwischen s_3 und s_1

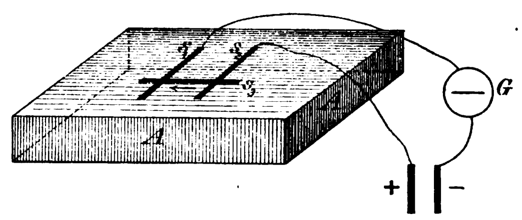


Fig. 102.

oder s_2 eindrängen. Da nun die Luft ein schlechter Leiter ist, so wird der Widerstand, den der Strom in der ganzen Anordnung findet, grösser, der Strom also schwächer.

Schalten wir statt eines Galvanoskops ein Telephon ein, so wird, wenn man *A* mit einem Finger berührt, weil die Stärke des durch die Drahtwindungen des Telephons fliessenden Stromes schwankt, der Magnetismus des Telephonmagnets in kurzen Intervallen verstärkt und geschwächt, die dünne Eisenscheibe also in Schwingungen versetzt. Spricht man gegen den Resonanzboden, so gerät derselbe infolge der Stösse, welche die schwingende Luft gegen ihn ausübt, in Schwingungen. Jede Schwingung des Resonanzbodens aber verursacht eine Kontaktänderung, also eine Änderung der Grösse des Widerstandes, und diese eine Schwingung der Eisenplatte des Telephons.

Eine einfache Form des Mikrophons ist in Fig. 103 dargestellt. *R* ist der Resonanzboden, *K* und *K'* sind Kohlenstücke mit je

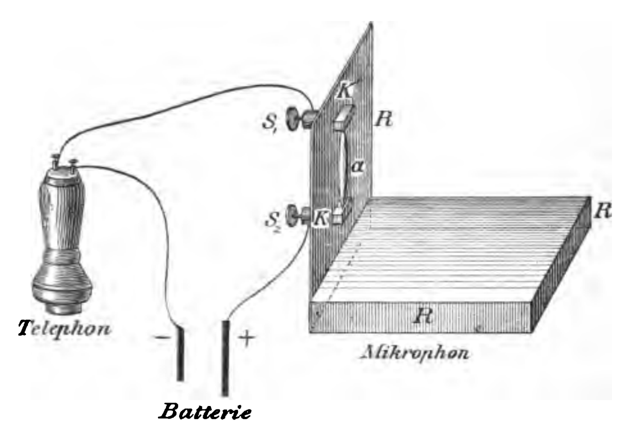


Fig. 103.

einer Vertiefung. In diese Vertiefungen greift das Kohlenstäbchen *a* ein, so dass lose Kontakte entstehen. *K* und *K'* sind mit den Klemmschrauben s_1 und s_2 leitend verbunden.

Der principielle Unterschied zwischen Telephon und Mikrophon ist also folgender: Beim Bell'schen Telephon wird ein Teil der Energie des Schalles in elektrische Energie umgewandelt, der elektrische Strom also erzeugt; beim

Hughes'schen System wird ein schon vorhandener elektrischer Strom bald geschwächt, bald verstärkt. Daraus folgt, dass beim Bell'schen System der Schall in dem Aufnahmeapparat (Ohrstück) stets schwächer ist als im Aufgabeapparat (Mundstück), während er beim Hughes'schen System unter Umständen stärker sein kann (cf. Warburg, Lehrbuch der Experimentalphysik).

Da es zu weit führen würde, auf die neueren Systeme näher einzugehen, so beschränken wir uns auf die Bemerkung, dass das System des Mikrophons von Ader und von Blake, welch letzteres wohl das verbreitetste aller Mikrophone ist, ähnlich ist dem des Hughes'schen.

Für eine gegenseitige telephonische Unterhaltung zwischen zwei Personen an den Stationen A und B sind vier Telephone (zwei zum Hören, zwei zum Sprechen) oder zwei Mikrophone (Sprechen) und zwei Telephone (Hören) erforderlich.

In Städten, wo viele Leute telephonische Verbindung mit einander haben, ist jedes Privattelephon mit einer Centralstelle leitend verbunden. Will nun A mit B sprechen, so setzt A den Beamten an der Centralstelle hiervon in Kenntnis. Alsdann stellt der Beamte die Verbindung zwischen A und B her. Nachdem das geschehen, wird B durch ein Signal mit der elektrischen Klingel davon benachrichtigt, dass eine telephonische Unterhaltung gewünscht wird. Es muss daher ein Umschalter in den Stromkreis gelegt werden, der selbstthätig eine Klingel ein- oder ausschaltet. Ein solcher selbstthätiger Umschalter ist in Fig. 104 (S. 124) abgebildet. Auf einem Holzbrettchen sind drei Metallsäulchen befestigt. *H* ist ein Hebel, der um den Punkt *b* drehbar ist. Wird das Telephon an den Haken *a* angehängt, so berührt das rechte Ende von *H* den Metallarm *e*, und es ist, wie man aus der Figur ersieht, die Klingel der Station B, wenn man auf den Taster *D* drückt, in den Stromkreis eingeschaltet. Wird aber das Telephon der Station A vom Haken entfernt, so zieht die Feder *F* den rechten Hebelarm nach unten, und da nun zwischen *H* und *e*

kein Kontakt mehr besteht, so ist die Klingel ausgeschaltet, das Telephon der Station B aber eingeschaltet.

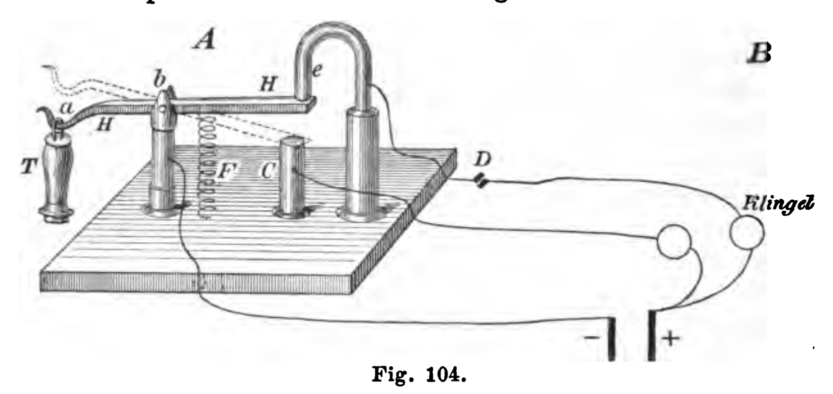


Fig. 104.

Bei grosser Entfernung der beiden Stationen bedient man sich der sogenannten induktiven Übertragung. Man schaltet bei dieser Übertragung in den Stromkreis des Mikrophons eine primäre Spule ein. Diese erzeugt in einer zweiten Spule, der sekundären, Induktionsströme, die durch die Fernleitung nach dem Telephon der zweiten Station fliessen. (Es wird also ein kleiner Transformator eingeschaltet.) Die Anordnung ist gewöhnlich so getroffen, dass auf jeder Station ein Element oder eine Batterie, ein Mikrophon und eine primäre Rolle einen geschlossenen Stromkreis bilden (siehe Fig. 105) — natürlich nur dann, wenn gesprochen wird — und die sekundäre Spule, die Fernleitung und das Telephon der zweiten Station ebenfalls einen Stromkreis bilden.

Das vollständige Schaltungsschema ist in Fig. 105 dargestellt (für eine Station). Wir wollen sehen, wie A sich mit B verständigen kann.

1) A drückt auf den Tastergriff *Gr* (in der Figur links oben). Der Taster ist gerade so eingerichtet wie der durch Fig. 92 abgebildete. Durch den Druck wird zwischen dem Taster und *K* ein Kontakt hergestellt, der Kontakt zwischen Taster und *p* aber aufgehoben. Der Strom der Klingelbatterie *K.B.* (unten) fliesst jetzt durch *K*, den Taster, nach *a*, durch *h* in die Fernleitung, aus dieser nach h_1 — wir bezeichnen

die entsprechenden nicht gezeichneten Teile der Station II durch Hinzufügung des Index 1 —, a_1, den Taster, p_1, die

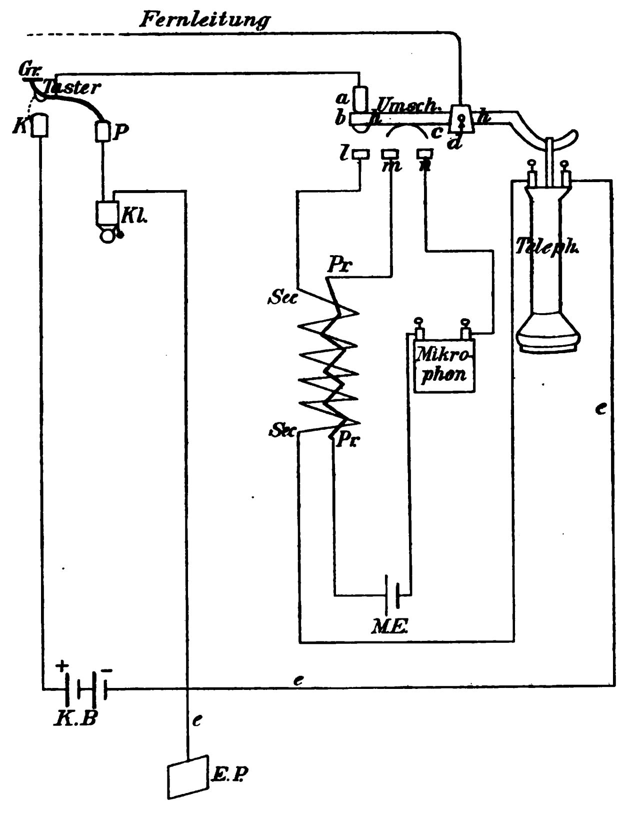


Fig. 105.

Klingel, zur Erdplatte, durch die Erde endlich — um es kurz auszudrücken — zur Klingelbatterie der Station I zurück.

2) Werden beide Telephone von den Haken abgenommen, so drehen sich die Umschalterhebel h und h_1 um d und d_1. Dadurch wird ein Kontakt hergestellt 1) zwischen b und l, 2) zwischen m und n; beide Klingeln werden ausgeschaltet, da zwischen a und h resp. a_1 und h_1 die leitende Verbindung aufgehoben ist. Jedes Mikrophon ist jetzt mit seinem Elemente *M.E.* verbunden, ferner ist eine ununterbrochene Leitung

zwischen den beiden Telephonen hergestellt. Spricht A in das Mikrophon, so werden in der sekundären Spule Induktionsströme erregt. Diese fliessen durch l, b, h, die Fernleitung, h_1, b_1, l_1, die sekundäre Spule S_1, das zweite Telephon durch e_1 zur Erde.

45. Das Glühen von Metalldrähten durch den elektrischen Strom.

Fliesst der elektrische Strom durch einen Leiter, so wird die Temperatur desselben erhöht, und zwar um so mehr, je grösser der Leitungswiderstand ist. Es wird sich also in demselben Stromkreise ein Eisendraht mehr erwärmen als ein gerade so dicker Kupferdraht. Schaltet man ferner in denselben Stromkreis einen dicken und einen dünnen Kupfer- oder Eisendraht ein (Fig. 106), so glüht unter Umständen der dünne Draht, während die Temperatur des dicken Drahtes sich nur unmerklich ändert. Die Temperatur eines vom Strome durchflossenen schlechten Leiters steigt so lange, bis entweder der Leiter abschmilzt oder die Wärmeabgabe an die Umgebung so gross ist wie die Wärmeerzeugung durch den Strom.

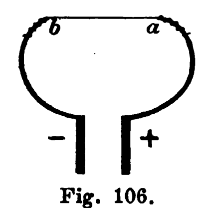


Fig. 106.

Bei der Erwärmung von Stromleitern haben wir es mit einer Umwandlung von elektrischer Energie in Wärme zu thun. Daraus folgt, dass ein elektrischer Strom von gegebener Stärke ein Drahtstück von bestimmter Länge und bestimmtem Querschnitte bis zu einer bestimmten Temperatur erwärmen kann. Nehmen wir an, dass bei dem in Fig. 106 angedeuteten Versuche das Stück ab zuerst so gewählt sei, dass dasselbe weissglühend wird; vergrössern wir dann ab nach und nach, so wird der dünne Draht zunächst rotglühend, dann hört er auf zu glühen, und schliesslich wird infolge des grossen Widerstandes der Strom so schwach, dass eine merkliche Temperaturerhöhung nicht mehr erfolgt.

Das Erglühen von Metalldrähten (Platin, Eisen) wird in der Praxis verwertet in der Sprengtechnik, der Chirurgie (Galvanokaustik) und dem Beleuchtungswesen.

In die Sprengpatrone werden zwei dickere Zuleitungsdrähte eingeführt und diese durch einen dünnen Eisen- oder Platindraht im Innern der Patrone mit einander verbunden. Werden die Zuleitungsdrähte mit einer galvanischen Batterie verbunden, so erglüht der dünne Draht und bewirkt die Entzündung des Sprengstoffes.

In der Chirurgie verwendet man das Glühen von Metalldrähten zur Abtragung krankhafter Wucherungen, zur Stillung von Blutungen und bei Operationen an schwer zugänglichen Stellen, z. B. der Nasen- und Rachenhöhle. Eine Platindrahtschlinge wird zunächst kalt appliziert, z. B. um die abzutrennende Stelle gelegt und dann durch Schliessen des Batteriestromes zum Glühen gebracht.

46. Elektrische Glühlichtlampen.

Ein bis zur Weissglut erhitzter Draht strahlt Licht aus. Je höher die Temperatur eines glühenden Körpers ist, um so mehr Lichtstrahlen sendet er aus. Ein weissglühender Eisendraht leuchtet lange nicht so stark wie ein gerade so langer, weissglühender Platindraht, weil man Platin ca. 200° C. stärker erwärmen kann als Eisen. Für Beleuchtungszwecke eignen sich also nur die Stoffe, deren Schmelzpunkt sehr hoch liegt; solche Stoffe sind Platin und Kohle. Glüht ein Draht (oder Kohle) in der atmosphärischen Luft, so verbindet er sich mit dem in der Luft enthaltenen Sauerstoff, er verbrennt. Will man also das Glühen von Drähten (oder Kohle) für Beleuchtungszwecke verwerten, so muss man den Draht in einen luftleeren Raum bringen. Das ist das Princip der elektrischen Glühlichtlampen. Kleinere Lampen werden in folgender Weise hergestellt: In eine Glaskugel werden zwei Zuleitungsdrähte eingeschmolzen (Fig. 107), die durch einen dünnen Platindraht verbunden sind, den man, damit er nicht zu kurz wird, zu einer Schleife umbiegt. Hierauf wird die Kugel luftleer gemacht — evakuiert — und dann zugeschmolzen. Besser

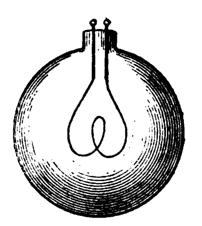


Fig. 107.

als Platindrähte, die infolge der Hitze leicht unbrauchbar werden, eignen sich dünne Bügel aus Holz- oder Papierkohle (Edison-Lampe).

Die Lampen, die in der elektrischen Beleuchtungstechnik Anwendung finden, bestehen aus folgenden Teilen: einem evakuierten Glasgefässe, einem Leiter von grossem Widerstande (dem Glühfaden), den Zuleitungsdrähten und dem Kragen. Den Glasgefässen, aus Klarglas, Mattglas oder farbigem Glase, giebt man die Gestalt einer Birne oder Kugel. Durch die Wand der Birne gehen die Zuleitungsdrähte hindurch. Diese müssen aus Platin angefertigt werden, da Platin das einzigste Metall ist, das sich beim Erwärmen gerade so stark ausdehnt wie Glas. An den in der Birne befindlichen Enden der Zuleitungsdrähte werden die Enden des Glühfadens (Kohlenfadens) befestigt. Die äusseren Enden der Platindrähte werden mit dem Schraubengewinde des Kragens und einem von diesem isolierten Kontaktstücke, dem Boden der Lampe, verbunden. Die Leitungsdrähte werden an das Muttergewinde der Lampenfassung, des Trägers, und an ein Kontaktstück im Boden der Fassung angeschlossen. Schraubt man nun die Lampe in die Fassung ein, so dass die beiden Kontaktstücke sich berühren, so ist eine ununterbrochene Leitung hergestellt.

Soll eine Glühlampe normal brennen, so muss ein Strom von bestimmter Stärke durch den Glühfaden hindurchfliessen. Angenommen, die erforderliche Stromstärke betrage 0,5 Ampère und der Widerstand des Glühfadens, wenn er heiss ist — der Widerstand des heissen Kohlenfadens ist viel kleiner als der des kalten — 200 Ohm, dann muss die Spannungsdifferenz nach dem auf Seite 54 mitgeteilten Gesetze 0,5 . 200 Volt = 100 Volt sein. Ist umgekehrt die Spannungsdifferenz an den Zuleitungsdrähten 100 Volt, so ist die Stärke des durch den Glühfaden fliessenden Stromes 0,5 Ampère. Es genügt also, wenn man weiss, wie gross die Spannung des durch die Lampe zu leitenden Stromes sein muss. So lange die vorgeschriebene Spannung herrscht, brennt die Lampe normal. In dem angeführten Beispiele verbraucht die Lampe einen Effekt von 0,5 . 100 Watt =

50 Watt. Brennt also eine solche Lampe eine Stunde lang, so verbraucht sie einen Effekt von 50 Wattstunden.

Die Leuchtkraft oder Lichtstärke der Glühlampen misst man nach Normalkerzen (Normalkerzen sind Paraffinkerzen von 20 mm Durchmesser und einer Flammenhöhe von 50 mm). Da man nun Lampen von den verschiedensten Kerzenstärken anfertigt, so gestattet die elektrische Glühlichtbeleuchtung eine weitgehende Verteilung des Lichtes. Der Stromkonsum oder der Effektverbrauch der 16kerzigen Lampen beträgt 50—55 Watt. Die Spannungsdifferenz an den Zuleitungsdrähten ist verschieden je nach der Grösse des Widerstandes, den der Glühfaden dem Strome entgegengesetzt. Über 220 Volt Betriebsspannung ist man bis jetzt nicht hinausgegangen, in den meisten Fällen beträgt sie 110 Volt.

Für die Speisung einer Glühlampe eignen sich Wechselströme so gut wie Gleichströme. Denn es ist gleichgültig, in welcher Richtung der Strom durch die Lampe hindurchfliesst, und die Stromimpulse folgen bei den Wechselströmen so schnell auf einander, dass eine Abkühlung des Glühfadens unter die normale Temperatur nicht erfolgen kann.

Da auch bei normaler Stromzufuhr der Strom den Glühfaden langsam zerstäubt, so brennt jede Lampe nur eine gewisse Anzahl von Stunden (etwa 1000 Stunden).

Über die Schaltung der Lampen siehe Seite 65.

47. Die Glühkörper von Prof. Dr. Nernst und Dr. Auer.

Obschon einer Verwertung der Erfindungen von Nernst und Auer für Beleuchtungszwecke einstweilen noch Hindernisse im Wege stehen, so wollen wir sie doch kurz besprechen.

Die Ökonomie unserer jetzigen elektrischen Glühlampen ist eine sehr ungünstige, da nur ein Bruchteil der der Lampe zugeführten Energie in wirksame Lichtstrahlen umgewandelt wird. Dies ist eine Folge des Umstandes, dass die Temperatur des Glühfadens nicht hoch genug ist. Mit wachsender Temperatur wächst nämlich das Lichtaussendungsvermögen der Körper sehr schnell (cf. Bogenlicht), d. h. je höher die Tem-

peratur des Glühkörpers einer Lampe ist, um so grösser ist der Nutzeffekt der Lichtquelle.

Diejenigen Stoffe, die, ohne dass sie schmelzen oder durch den elektrischen Strom in kurzer Zeit zerstäubt werden, bis zu einer sehr hohen Temperatur erhitzt werden können, sind bei gewöhnlicher Temperatur Nichtleiter der Elektricität. Dies gilt von der Thonerde, dem Kalke, der Magnesia und den seltenen Erden. Erwärmt man aber diese Stoffe durch eine Flamme oder durch irgend eine andere Wärmequelle, so wächst das Leitungsvermögen, so dass ein Strom nicht zu hoher Spannung durch sie hindurchfliessen kann.

Prof. Dr. Nernst benutzt für seinen Glühkörper gebrannte Magnesia. Diese als Verbrennungsprodukt verbindet sich, wenn sie in der atmosphärischen Luft glüht, nicht mit Sauerstoff. Daher braucht der Nernst'sche Glühkörper nicht in ein luftleeres Glasgefäss eingeschlossen zu werden.

„Nach Mitteilungen, die an die Öffentlichkeit gedrungen sind, lieferte ein dünnes Hohlcylinderchen aus Magnesia von nicht ganz 1 cm Länge, welches (nachdem es durch eine Flamme vorgewärmt worden war) durch einen Wechselstrom von $^1/_4$ Ampère und 118 Volt am Glühen erhalten wurde, ein Licht von 25 Hefnerkerzen, das wären also pro Watt rund 1 Hefnerkerze, während die bisher angewandten Glühlampen pro Hefnerkerze 3—4 Watt erfordern" (Journal für Beleuchtungszwecke und Wasserversorgung, Jahrg. 1898 Nr. 15).

Die Temperatur des glühenden Nernst'schen Körpers beträgt mehr als 3000° C.

Es soll dem Erfinder gelungen sein, seinem Glühkörper eine solche Zusammensetzung zu geben, dass beide Stromarten (Wechselstrom und Gleichstrom) zur Speisung der Lampen benutzt werden können.

Die Nernst'sche Erfindung haben verschiedene Elektricitäts-Gesellschaften — in Deutschland die Allgemeine Elektricitäts-Gesellschaft, Berlin — erworben, und man darf erwarten, dass Methoden zur automatischen Erwärmung erfunden werden.

Dr. Auer v. Welsbach benutzt bei der Herstellung seiner neuen Glühkörper Osmium und Thoroxyd.

Das Osmium, ein beständiger Begleiter des Platins, verbrennt in fein verteiltem Zustande in der Luft zu Überosmiumsäureanhydrid (OsO_4). Es ist äusserst schwer schmelzbar. Erhitzt man einen Osmiumfaden bis zu einer sehr hohen Temperatur im Vakuum oder in einem Raume, der mit Gasen gefüllt ist, „die reduzierend wirken“, so sendet der Faden ein intensives helles Licht aus. Eine Methode zur Herstellung des Osmiumfadens beschreibt der Erfinder folgendermassen: „Ein 0,02 mm starker Platindraht wird in eine Kohlenwasserstoffatmosphäre gebracht, welche reichlich mit Wasserdampf vermischt ist und in welche von Zeit zu Zeit kleine Mengen von Uberosmiumsäureanhydrid (OsO_4) eingeblasen werden. Darauf glüht man den Draht in dieser Atmosphäre; infolge dessen schlägt sich auf demselben eine dünne Schicht von metallischem Osmium, welche sich jedoch nur langsam bilden darf, nieder“ (OsO_4 wird reduziert). Diese Operationen müssen, da sich bei dem beschriebenen Verfahren nur ein sehr dünnes Häutchen bilden kann, oft wiederholt werden. Wenn die den Platindraht umgebende Osmiumhülle genügend dick ist, wird der kleine Cylinder nochmals stark geglüht, bis sich der Platindraht verflüchtigt.

Der Nutzeffekt der neuen Glühlampe soll ein sehr hoher sein. Der elektrische Effekt pro Normalkerze wird zu 1,5 bis 2 Watt angegeben.

Einen anderen Glühkörper gewinnt Dr. Auer dadurch, dass er einen sehr dünnen Platindraht mit einem dünnen Uberzug von Thorerde umgiebt. Die sehr feuerbeständige Thorerde entzieht, wenn man das Cylinderchen stark erhitzt, der Platinseele den grössten Teil der zugeführten Stromenergie und setzt sie in Wärme und Licht um.

48. Das elektrische Bogenlicht.

Verbindet man zwei Kohlenstäbchen (Retortenkohle) durch Drähte mit den Polen einer starken Stromquelle, und bringt man dann die Spitzen der Kohlen aneinander, so dass sie sich berühren, so ist der Stromkreis geschlossen. Trennt man nun

die Enden der Kohlen ein wenig von einander, etwa 1 mm, so entsteht ein ausserordentlich helles Licht. Diese Erscheinung, die man übrigens nicht mit dem elektrischen Funken verwechseln darf, beobachtete zuerst Davy (1821) und wird der Davy'sche Lichtbogen genannt.

Die Erklärung des Phänomens ist folgende: Berühren sich die beiden Kohlenstäbchen, so ist der Widerstand im Stromkreise nicht gross; entfernt man aber die Stäbchen etwas von einander, so wird eine Luftschicht in den Schliessungsbogen eingeschaltet. Da nun die Luft ein sehr schlechter Stromleiter ist, so wird durch die Entfernung der Kohlenstäbchen der Widerstand bedeutend vermehrt und, wie wir gesehen haben, ein grosser Teil der elektrischen Energie in Wärme umgewandelt. Durch die entwickelte und auf einen kleinen Raum concentrierte grosse Wärmemenge werden die Kohlenspitzen bis zur Weissglut erhitzt; auch die Luft zwischen den Spitzen wird glühend. Wahrscheinlich verdampft die Kohle an den Spitzen. Der Lichtbogen zwischen den Kohlen ist verhältnismässig schwach leuchtend, da glühende Gase nur wenig Licht aussenden; dagegen geht von den weissglühenden Kohlenspitzen, besonders von der positiven, ein Licht aus, das alle irdischen Lichtquellen an Helligkeit übertrifft. Von den Kohlenspitzen trennen sich kleine glühende Kohlenteilchen; diese fliegen sowohl nach der gegenüberliegenden Elektrode als auch seitlich in den Raum hinein. Die positive Kohle höhlt sich kraterförmig aus, die negative spitzt sich zu (Fig. 108).

Die Wärmeentwickelung an den Elektroden ist eine sehr grosse; die Temperatur wird auf 2000 bis 4000° geschätzt. Da aber die Wärmeentwickelung auf einen kleinen Herd beschränkt ist, so wird die Umgebung der Kohlenspitzen trotzdem nicht stark erwärmt.

Die Kohlen für die Bogenlampen werden in Fabriken hergestellt; man benutzt bei der Fabrikation Retortenkohle, d. h. die Kohle, die sich bei der Gasfabrikation an den Wänden der Retorten ansetzt. Der pulverisierten Kohle setzt man ein Bindemittel zu (z. B. Theer), um eine plastische Masse zu erhalten. Die Fabrikation der positiven Kohle, von der ungefähr 9 mal

so viel Licht ausgeht wie von der negativen Kohle, unterscheidet sich dadurch von der Fabrikation der negativen Kohle, dass sie einen weicheren Kern, den sogenannten Docht, erhält, damit der Abbrand dieser Kohle nach allen Richtungen gleichmässig erfolgt. In unserer Figur 108, für die uns die Allgemeine Elektricitäts-Gesellschaft, Berlin, das Cliché zur Verfügung gestellt hat, ist die obere Kohle (positive) die Dochtkohle, die untere die Homogenkohle.

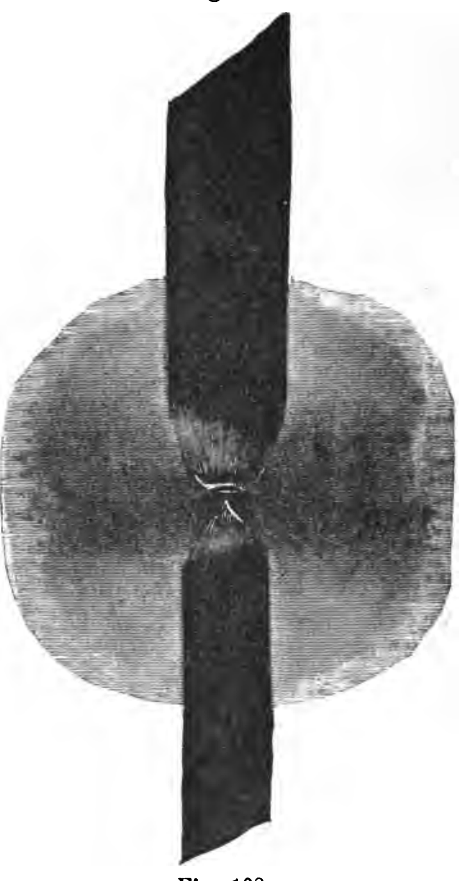


Fig. 108.

Die zum Betriebe einer Gleichstrom-Bogenlampe erforderliche Spannung beträgt 38—45 Volt, die Stromstärke meistens 4 bis 15 Ampère.

Wird eine Bogenlampe durch Wechselstrom gespeist, so ist bald die obere bald die untere Kohle die positive. Daher brennen beide Kohlen gleichmässig ab und wird das Licht bald nach oben, bald nach unten geworfen. Die Lampenspannung ist bei Wechselstrom - Bogenlampen kleiner als bei Gleichstrom-Bogenlampen, nämlich nur 30 bis 35 Volt, die Stromstärke aber grösser.

Da die Kohlenspitzen abbrennen — die positive ungefähr doppelt so stark wie die negative —, so wird die Entfernung der Spitzen, wenn auch langsam, doch stetig grösser. Will

man daher das elektrische Bogenlicht für Beleuchtungszwecke benutzen, so muss in der Lampe ein Mechanismus angebracht werden, der die Entfernung zwischen den beiden Kohlenstäben reguliert. Da nun die Kohle am positiven Pole ungefähr doppelt so stark verbrennt wie am negativen, so muss, wenn der Lichtbogen immer an derselben Stelle bleiben soll (Fixpunkt-Bogenlampe), die positive Kohle doppelt so stark vorgerückt werden wie die negative. Ein Regulator muss aber noch mehr leisten: er muss dafür sorgen, dass die Kohlenspitzen sich beim ersten Durchgang des Stromes berühren und, nachdem sie glühend geworden sind, eine der Stromstärke entsprechende Entfernung erhalten und beibehalten.

Von den verschiedenen Vorrichtungen zur Regulierung der Entfernung der Kohlenstäbe, die in grosser Anzahl und mit grossem Scharfsinn konstruiert worden sind, wollen wir nur eine beschreiben, und zwar

49. Die Differentiallampe von v. Hefner-Alteneck.

(Siemens-Halske's Patent.)

Wir beschränken uns darauf, das Princip des genannten Regulators zu erklären. In unserer schematischen Fig. 109 ist H ein um D drehbarer Hebel, der an seinem einen (linken) Ende einen Eisenstab S, an seinem anderen Ende einen Halter F_1 für das Kohlenstäbchen C_1 trägt. In F_1 ist ein Mechanismus angebracht, der das Kohlenstäbchen C_1 festhält, wenn der Hebel wagerecht ruht, dagegen C_1 loslässt, wenn sich der rechte Hebelarm senkt. Das zweite Kohlenstäbchen C_2 ist in dem Halter F_2 befestigt. Der von der Dynamo-

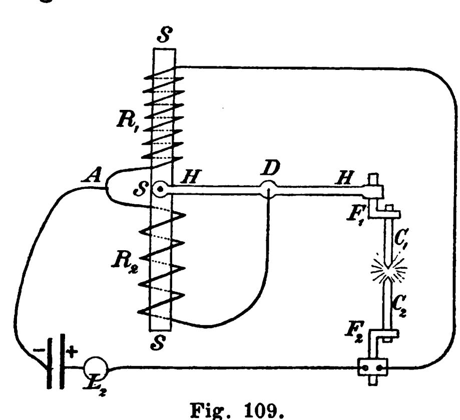


Fig. 109.

maschine kommende Leitungsdraht teilt sich bei A: der eine Zweig geht zu einer Drahtspirale R_1, die aus vielen Windungen eines dünneren Drahtes, der andere zu einer Spirale R_2, die aus wenigen Windungen eines dickeren Drahtes besteht. R_1 ist mit F_2 und R_2 mit D, also auch mit C_1 leitend verbunden. Nehmen wir nun zunächst an, die Kohlenspitzen berührten sich nicht: dann fliesst der ganze Strom von A aus durch die Windungen der Spirale R_1 und von dort über F_2 zur nächsten Lampe (in der Figur durch einen Kreis angedeutet). Die vom Strome durchflossene Spirale zieht nun den Stab S in sich hinein, infolge dessen senkt sich der rechte Hebelarm, der Mechanismus lässt das Kohlenstäbchen los, und dieses bewegt sich nach unten. Berühren sich die beiden Kohlenstäbchen, so fliesst der Strom zum grössten Teile wegen des kleineren Leitungswiderstandes durch R_2, nach D, C_1, C_2, zur nächsten Lampe, und die Kohlenspitzen geraten ins Glühen. Gleichzeitig aber zieht die vom Hauptstrome durchflossene Spirale R_2 den Stab nach unten: der rechte Hebelarm wird gehoben, und es entsteht, da die Kohlenspitzen von einander getrennt werden, der Lichtbogen. Wird die Entfernung der Spitzen zu gross, so fliesst der Strom durch R_1, und dieses Solenoid zieht den Stab kräftig in sich hinein etc. Die Lampe heisst Differentiallampe, weil die beiden Solenoide den Stab in sich hinein zu ziehen suchen, und die Grösse der Hebeldrehung von der Differenz der beiden auf den Stab wirkenden Kräfte abhängt.

50. Die Galvanoplastik*).

Die Galvanoplastik, die einen wichtigen Industriezweig bildet, im weiteren Sinne umfasst die sogenannte Galvanostegie und die Galvanoplastik im engeren Sinne. Unter G a l v a n o s t e g i e versteht man die Herstellung von Metallüberzügen auf anderen Metallen oder Bilder- und Spiegelrahmen etc., sei es um dem betreffenden Gegenstande ein schöneres Aussehen

*) Vor dem Durchlesen dieses und des folgenden Abschnittes den Abschnitt: Elektrolyse zu studieren, raten wir dem Leser an.

zu verleihen, sei es um seine Haltbarkeit zu erhöhen (Rosten etc. zu verhindern). Die Galvanoplastik im engeren Sinne hat die Aufgabe, Nachbildungen von Gegenständen, einer Münze, einer Gipsfigur etc. zu liefern. Bei dem galvanoplastischen Verfahren im engeren Sinne muss man den Überzug, damit man ihn von der Form ablösen kann, ziemlich dick herstellen.

Die meisten Metalle werden von den Säuren (Schwefelsäure, Salzsäure, Salpetersäure) aufgelöst. Bei diesem Prozesse entweicht Wasserstoff, der einen Bestandteil der Säuren bildet, und es entstehen die sogenannten Salze. So ist z. B. das Salz des Kupfers (Cu) mit der Schwefelsäure (H_2SO_4) Kupfervitriol (schwefelsaures Kupfer, Kupfersulfat, $CuSO_4$), das Salz der Salzsäure und des Metalls Natrium das Kochsalz. In jedem Salze ist also der eine Bestandteil ein Metall. Die Mehrzahl der Salze ist in Wasser löslich. Leitet man nun den elektrischen Strom durch die wässerige Lösung eines Salzes, so wird dasselbe zerlegt und das Metall ausgeschieden. Da die Ausscheidung des Metalls an der ganzen Fläche der negativen Elektrode langsam und gleichmässig vor sich geht, so bedeckt sich diese, wenn der Strom längere Zeit durch die Lösung fliesst, mit einer Schicht des betreffenden Metalls, und man erhält einen getreuen Abdruck derselben. Die Methode, die denkbar getreuesten Abdrücke von Gegenständen vermittelst elektrolytisch ausgeschiedenen Kupfers zu erhalten, nannte Jacobi (1838) Galvanoplastik.

Ist die negative Elektrode reines Metall, so haftet der Überzug ganz fest auf der Oberfläche des Metalls; überzieht man aber die negative Elektrode mit einer dünnen Fett- oder Ölschicht, so lässt sich der Überzug, falls er eine gewisse Dicke hat, leicht abnehmen.

Um Nachbildungen von Gegenständen, z. B. einer Münze, zu erhalten, verfährt man folgendermassen: Man nimmt von der Münze einen Abdruck in Guttapercha oder Wachs (den Erhabenheiten des Originals entsprechen Vertiefungen in dem Abdruck und umgekehrt — negativer Abdruck). Auf den negativen Abdruck trägt man, damit er die Elektricität leitet,

vermittelst eines Pinsels eine dünne Schicht gepulverten Graphits auf. Die so erhaltene Form verbindet man durch einen Draht mit dem negativen Pole eines galvanischen Elementes, den anderen Pol aber mit einer Metallplatte und taucht dann die beiden Elektroden in ein Bad von Kupfervitriol, dem man etwas Schwefelsäure zusetzt. Damit die Kupfervitriollösung stets concentriert bleibt, legt man auf den Boden der Zersetzungszelle einige Stücke Kupfersulfat. Nimmt man aber als positive Elektrode eine Kupferplatte (Fig. 110), so bleibt

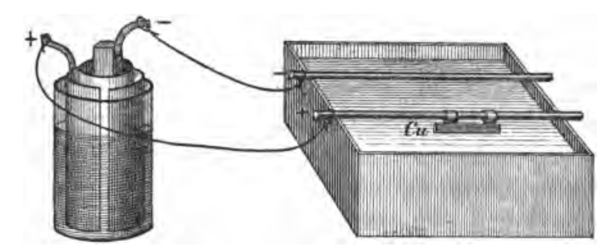


Fig. 110.

die Lösung stets concentriert, auch wenn man keine überschüssigen Krystalle zufügt. Es geht nämlich von dem Kupfer der positiven Elektrode gerade so viel in die Lösung über, wie sich an der negativen niederschlägt. Nach mehreren Tagen ist der Kupferüberzug, der sich auf dem Abdruck niedergeschlagen hat, so dick, dass man ihn abnehmen kann.

Es ist nun nicht nötig, einen besonderen Zersetzungsapparat für galvanoplastische Versuche in kleinem Massstabe anzuwenden, indem man die Form selbst als Polplatte eines Daniell'schen Elementes benutzen kann. Fig. 111 stellt einen für galvanoplastische Versuche in kleinem Massstabe geeigneten Apparat dar. In das weitere Glasgefäss *G* ist ein kleineres, engeres Gefäss *g* vermittelst der Drahtarme *a* eingehängt; *g* ist unten mit einer Schweins- oder Ochsenblase überspannt. In das weitere

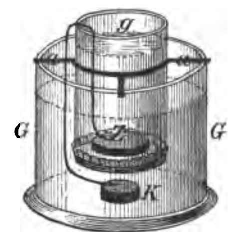


Fig. 111.

Gefäss giesst man concentrierte Kupfervitriollösung, in das engere stark verdünnte Schwefelsäure (30 g Wasser + 1 g

Schwefelsäure). An der Zinkplatte *Z*, die den Boden nicht erreichen darf, ist ein Kupferdraht befestigt, das andere Ende des Drahtes ist mit der Form *K* leitend verbunden. Damit sich an dem Verbindungsdrahte nicht unnötig Kupfer niederschlägt, umgiebt man ihn mit einer isolierenden Schellack- oder Siegellackschicht. Die Anordnung ist nun nichts anderes als ein Daniell'sches Element, bei dem die Kupferplatte ersetzt ist durch die Form *K*. Der Strom geht ausserhalb der Kette von der Form zum Zink, innerhalb derselben aber vom Zink zur Form; also ist *K* für den Strom, der innerhalb des Apparates fliesst, der negative Pol.

Man verwertet ferner den Niederschlag des Kupfers durch den galvanischen Strom zur Herstellung von Kopien gestochener Kupferplatten und Holzschnitte. Das zu vervielfältigende Bild wird auf eine Holzplatte eingeschnitten oder auf eine Kupferplatte eingraviert; von den Originalplatten werden auf elektrolytischem Wege Nachbildungen hergestellt, von denen man die Abzüge nimmt (Clichés, Galvanos). Auf diese Weise wird die Originalplatte geschont.

Vernickelung. Die galvanische Vernickelung hat wegen der schönen Farbe des Nickels und der schönen Politur, die es leicht annimmt, von allen Zweigen der Galvanostegie die ausgedehnteste technische Verwendung gefunden. Die elektrolytische Flüssigkeit, das sogenannte Bad, wird auf verschiedene Weise hergestellt. Vielfach mischt man je 1 l Wasser mit 70 g schwefelsaurem Nickeloxydammoniak. Dem Bade setzt man, um seine Leitungsfähigkeit zu erhöhen, ein anderes Salz, z. B. Chlorammonium, zu. Als Anode benutzt man eine Nickelplatte, als Kathode die zu vernickelnden Gegenstände (meistens Gegenstände aus Eisen).

Versilberung. Das Bad besteht aus Cyankalium (9 l Wasser + 250 g Cyankalium) und salpetersaurem Silber (150 g in 1 l Wasser gelöst).

Vergoldung. „Es wird als passendes Goldbad empfohlen eine Lösung, welche in 10 l Wasser 10 g Cyankali, 60 g phosphorsaures Natron, 100 g doppelt schwefelsaures Natron und 10 g Chlorgold enthält“ (Grätz, Die Elektricität und ihre Anwendungen).

Zum Schlusse wollen wir die wichtigsten Anwendungen der Galvanoplastik zusammenstellen:

1) Herstellung von monumentalen Figuren (die drei grossen Figuren des Gutenberg-Monuments in Frankfurt a. M. sind auf galvanoplastischem Wege hergestellt worden), Gegenständen des Kunstgewerbes und Massenfabrikation von Schmuckgegenständen,
2) Kopieren von Münzen etc.,
3) Herstellung von Galvanos und Clichés, um die Originale zu schonen,
4) Hervorbringung metallischer Niederschläge auf anderen Metallen, als Vergoldung, Versilberung von Löffeln, Tafelaufsätzen etc., Vernickelung von Drähten und Werkzeugen, um sie vor Rost zu schützen,
5) Verstählen von Kupferplatten, um sie vor Abnutzung zu schützen.

51. Die Elektrochemie.

Obschon bis jetzt nur ein kleiner Teil des grossen Gebietes der Elektrochemie beackert worden ist, so sind doch die Früchte, die auf diesem Gebiete gezeitigt wurden, für die Industrie äusserst wertvoll geworden, und man kann mit Sicherheit erwarten, dass die Elektrochemie der Menschheit noch weitere grosse Dienste erweisen wird.

Unter Elektrochemie versteht man die Darstellung chemischer Stoffe mit Hülfe des elektrischen Stromes. In den meisten Fällen verwertet man die elektrolytische Kraft des Stromes, seltener die Wärmeentwickelung durch den Strom (Joule'sche Wärme).

Wir wollen einige Zweige der Elektrochemie kurz besprechen:

1) *Gewinnung von Metallen in reinem Zustande durch Elektrolyse.* Bei dem elektrischen Verfahren zur Gewinnung und Reinigung von Metallen muss man dafür sorgen, dass die *Polarisation möglichst klein* wird, da ja der Polarisationsstrom den Zersetzungstrom bekämpft.

Zersetzen wir beispielsweise Kupfervitriol mittels Platinelektroden, so entsteht eine elektromotorische Gegenkraft, die bis zu 1,35 Volt steigt. Nehmen wir nun an, der Widerstand im Bade betrage $^1/_4$ Ohm und wir wollen einen Strom von 20 Ampère haben, dann beträgt der Spannungsverlust im Bade $^1/_4 \,.\, 20$ Volt = 5 Volt. Wäre nun keine Polarisation vorhanden, so müssten wir einen Effekt von 5.20 Watt aufwenden; ist aber die elektromotorische Gegenkraft 1,35 Volt, so müssen wir 20.6,35 Watt, also 27 Watt mehr aufwenden als eben. Man kann nun die Polarisation dadurch verringern, dass man den Jonen, besonders dem Anion, Gelegenheit giebt, an den Elektroden Arbeit zu leisten. Das kann man bei der Elektrolyse des Kupfervitriols z. B. dadurch erreichen, dass man als Anode eine Kupferplatte benutzt, indem sich dann SO_4 mit Cu der Anode zu $CuSO_4$ (Kupfervitriol) verbindet.

Unter Stromdichtigkeit versteht man das Verhältnis der Stromstärke — also der Elektricitätsmenge — zur Grösse der Anodenoberfläche. Beispiel: die Stromstärke betrage 40 Ampère, die Oberfläche der Anode 4 qm; die Stromdichtigkeit ist also 10 Ampère (pro qm). Bei den meisten elektrolytischen Verfahren zur Metallgewinnung muss die Stromdichtigkeit eine vorgeschriebene Grösse haben. Nehmen wir z. B. an, es handle sich um die Zersetzung von $CuSO_4$. In jeder Sekunde wird, wie wir gesehen haben (S. 73), pro Ampère eine gewisse Menge SO_4 frei, das sich an der Anode mit Cu zu $CuSO_4$ vereinigen soll. Nun kann sich an der Anode in jeder Sekunde an jedem Quadratcentimeter Oberfläche nur eine gewisse Menge SO_4 mit Cu vereinigen, überschüssiges SO_4 findet also keinen Platz für seine Thätigkeit. Entwickelt sich anderseits an der Kathode zu viel Cu, so bildet sich nicht ein kompakter Niederschlag, sondern eine schwammige, poröse Masse.

a) Gewinnung von Reinkupfer aus Schwarzkupfer und Kupferstein (Hüttenwerk zu Ocker i. S.). Schwarzkupfer und Kupferstein werden aus den Kupfererzen durch hüttenmännisches Verfahren gewonnen (Rohkupfer). Um sie von den Beimengungen zu befreien, formt man aus ihnen dicke,

grosse Platten. Diese dienen als Anoden; das Bad besteht aus gelöstem Kupfervitriol; die Kathode ist eine Reinkupferplatte. Die Verunreinigungen fallen aus, man muss daher ab und zu das Bad erneuern. Es geht also bei diesem Verfahren das Cu von der einen Elektrode zur anderen über. Die Stromdichtigkeit beträgt 20—40 Ampère pro qm.

b) Verfahren von Siemens & Halske zur Gewinnung reinen Kupfers aus Kupfererzen. Die Kupfererze werden pulverisiert und durch Ferrisulfat $Fe_2(SO_4)_3$ ausgelaugt.

$$Fe_2(SO_4)_3 + Cu = CuSO_4 + 2 FeSO_4 \text{ (Ferrosulfat).}$$

Wird die Lauge elektrolysiert, so wird sowohl das Kupfervitriol als auch das Ferrisulfat zersetzt, und zwar werden Cu und Fe von der Kathode frei. Cu schlägt sich auf der Kathode nieder, das frei gewordene Eisen fällt aus dem Kupfervitriol Kupfer ($CuSO_4 + Fe = FeSO_4 + Cu$). An der Anode wird SO_4 frei; dieses verbindet sich mit $2 FeSO_4$ zu $Fe_2(SO_4)_3$.

2) Gewinnung von Metallen mit Hülfe der Joule'schen Wärme und der elektrolytischen Kraft. Hierher gehört die Darstellung des Aluminiums, der Aluminiumbronzen und des Magnesiums.

Verfahren von Hérault: In einem Kohlentiegel wird Kupfer geschmolzen. Das geschmolzene Kupfer dient als negative Elektrode (Kathode). Auf das geschmolzene Kupfer bringt man Thonerde und ein geeignetes Flussmittel (Zusatz, um das Schmelzen der Thonerde zu erleichtern). Die positive Elektrode besteht aus mehreren parallelen, durch Metallstäbe gitterartig mit einander verbundenen Kohlenstäben. Durch die Stromwärme — man benutzt einen Strom von 12000 Ampère — wird die Thonerde geschmolzen. Die flüssige Thonerde leitet den Strom und wird zersetzt ($Al_2O_3 = Al_2 + O_3$). Das frei gewordene Aluminium verbindet sich mit Kupfer zu Aluminiumbronze.

Ähnlich ist das Verfahren zur Magnesiumgewinnung. Als Zersetzungsmaterial dient Magnesiumchlorid.

Die Darstellung von Zink, Nickel und Kobalt aus ihren Erzen ist zwar gelungen, aber, so viel uns bekannt ist, noch nicht technisch verwertet worden.

Ozondarstellung. Das Ozon ist eine Modifikation des Sauerstoffs. Das Sauerstoffmolekül besteht aus zwei Atomen Sauerstoff (O_2), das Ozonmolekül dagegen aus drei Atomen (O_3). Da das Ozon das dritte Molekül leicht abgiebt, so wirkt es stark oxydierend. Darauf beruht seine vielseitige Anwendung für technische Zwecke. Man benutzt Ozon, um nur einige Anwendungen hervorzuheben, um jungem, frischem Holze die Eigenschaften des alten zu geben (Holz der Violinen), um das Altern des Branntweins und der Portweine zu beschleunigen, zur Entfuselung des Spiritus, in der Bleicherei etc. Das Ozon entsteht bei jeder elektrischen Entladung, z. B. wenn man die Funken eines Induktionsapparates durch die Luft gehen lässt. Günstiger als der elektrische Funke wirkt die sogenannte dunkle Entladung (Glimmentladung). Zur Darstellung des Ozons kann man sich der Siemens'schen Induktionsröhre bedienen. Sie besteht aus zwei Röhren, einer weiteren und einer engeren. Die weitere Röhre ist auf der Aussenseite, die engere auf der Innenseite mit Stanniol belegt. Die engere Röhre wird in die weitere hineingeschoben. Die beiden Belegungen werden mit den Polen eines Induktionsapparates verbunden. Zwischen beiden Röhren cirkuliert ein Sauerstoff- oder Luftstrom.

52. Röntgen-Strahlen (X-Strahlen).

Fluorescenz. Sieht man durch eine ätherische Chlorophylllösung*) hindurch, gelangen also die durch die Lösung hindurchgegangenen Strahlen in unser Auge, so erscheint die Lösung grün gefärbt. Betrachtet man aber die Flüssigkeit von der Seite oder von oben, so dass wir reflektierte Strahlen wahrnehmen, so erscheint die Lösung rotbraun. Man nennt diese Erscheinung Fluorescenz (abgeleitet von Fluorescin). Uranglas fluoresciert grünlich, eine schwefelsaure Chininlösung bläulich etc.

---

*) Chlorophyll = Blattgrün. Den grünen Farbstoff der Blätter etc. kann man durch Spiritus und Äther extrahieren. Statt frischer Pflanzenteile kann man trockene Theeblätter benutzen.

Hittorf'sche oder Crookes'sche Röhren. Bei der Geissler'schen Röhre, überhaupt bei jeder Röhre, die nicht sehr stark evacuiert ist (bei der die Luftverdünnung nicht sehr weit getrieben ist), beobachten wir an der Eintrittsstelle des Funkenstromes (Anode) rotes und an der Austrittsstelle blauviolettes Licht. Treiben wir die Luftverdünnung in einer solchen Röhre immer weiter, so zieht sich das rote Licht (Anodenlicht) immer mehr zurück, und wir gelangen zu einem Punkte, wo das bläuliche Licht fast die ganze Röhre erfüllt. Es gehen dann von der Kathode Strahlen aus, die sogenannten Kathodenstrahlen, die sich nur geradlinig in der Röhre fortpflanzen und nicht, wie es sonst bei Entladungen im luftverdünnten Raume geschieht, den Krümmungen der Röhre folgen. Benutzen wir also zwei rechtwinklig gebogene Glasröhren, an deren Enden Zuleitungsdrähte eingeschmolzen sind, und von denen die eine sehr stark, die andere weniger evacuiert ist, so beobachten wir, wenn wir jede der beiden Röhren mit den Polen eines Induktionsapparates verbinden, dass in der ersten Röhre die Kathodenstrahlen nur durch den einen Schenkel hindurch gehen, während der Entladungsstrom in der anderen Röhre um die Ecke herumbiegt. Dort, wo die Kathodenstrahlen die Glaswand treffen, erregen sie grünliches Fluorescenzlicht. Das grünliche Fluorescenzlicht ist das Zeichen der Existenz der Kathodenstrahlen.

X-Strahlen. „Lässt man durch eine Hittorf'sche Vacuumröhre oder einen genügend evacuierten Lenard'schen, Crookes'schen oder ähnlichen Apparat die Entladungen eines grösseren Ruhmkorff's gehen und bedeckt die Röhre mit einem ziemlich eng anliegenden Mantel aus dünnem, schwarzem Carton, so sieht man in dem vollständig verdunkelten Zimmer einen in die Nähe des Apparates gebrachten, mit Bariumplatincyanür angestrichenen Papierschirm bei jeder Entladung hell aufleuchten, fluorescieren" (W. C. Röntgen: Eine neue Art von Strahlen). Die von der Röhrenwand ausgehenden Strahlen nennt Röntgen, da das Wesen dieser Strahlen noch nicht aufgeklärt ist, X-Strahlen. Die X-Strahlen sind verschieden von den Kathodenstrahlen; sie sind wahrscheinlich modificierte Kathoden-

strahlen. Interessant ist nun die Eigenschaft der X-Strahlen, durch die meisten Körper hindurch zu gehen. Dicke Holzplatten, die man zwischen den Fluorescenzschirm und die Röhre hält, werfen fast gar keinen Schatten, Holz ist also für die X-Strahlen sehr durchlässig. Zu den Körpern, die die X-Strahlen weniger gut oder schlecht durchlassen, gehören Knochen und Metalle. (Die Vorlagen der Figuren 9 und 10 sind mit Hülfe der X-Strahlen hergestellt worden.) Drückt man daher gegen die Rückwand des Bariumplatincyanürschirmes eine Hand, so sieht man in dem Schattenbilde der Hand deutlich die Knochen als dunklere Partien. — Eine sehr wertvolle Eigenschaft der X-Strahlen ist die, auf photographische Trockenplatten chemisch einzuwirken. Man kann daher Skeletttteile des menschlichen Körpers photographieren. Will man bei Tageslicht z. B. die Handknochen photographieren, so wickelt man in der Dunkelkammer eine photographische Trockenplatte in schwarzes Papier ein, legt sie unter die Röhre (15—20 cm Abstand), drückt die Hand fest gegen die Platte und setzt den Induktionsapparat in Thätigkeit. Die Expositionszeit ist verschieden, sie richtet sich nach der Dicke des zu photographierenden Körperteiles, nach der Funkenlänge des Induktoriums und der Güte der Röhre.

Eine viel benutzte Röhre für Röntgen-Aufnahmen von Leybold's Nachfolger in Köln zeigt die Fig. 112. Als Kathode

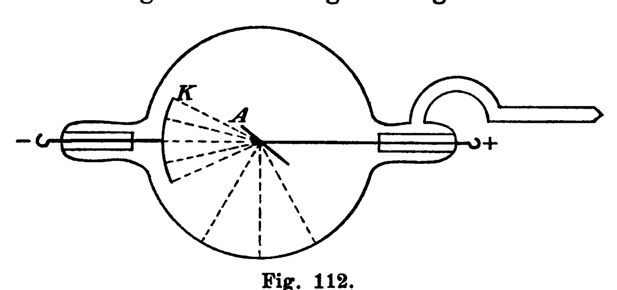


Fig. 112.

dient ein Hohlspiegel aus Aluminium. Die Kathodenstrahlen gehen senkrecht zur Oberfläche *K* nach rechts und schneiden sich im Krümmungsmittelpunkte des Spiegels. Dort befindet sich die Anode, ein Platinplättchen. An der Anode werden die Kathodenstrahlen nach unten geworfen.

53. Die Versuche von Hertz und Tesla*), Funkentelegraphie (Telegraphie ohne Drähte).

Die Hertz'schen Versuche und ihre Erklärung sind veröffentlicht in dem unsterblichen Werke: Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft von Dr. H. Hertz, Leipzig 1892, Joh. Ambros. Barth. Dieses Werk besteht aus einer Reihe von Abhandlungen, von denen die zwölf ersten auch von einem nicht mathematisch geschulten Leser verstanden werden können. Die folgenden Zeilen sollen dem Leser nur klar machen, um was es sich bei den Hertz'schen Versuchen handelt.

Eine der Hauptaufgaben, die Hertz sich gestellt hatte, bestand darin, die Geschwindigkeit, mit der sich die elektrodynamische Kraft im Raume fortpflanzt, zu bestimmen. Wir haben gesehen, dass in einem Drahte, der sich in der Nähe eines Stromleiters befindet, Ströme induziert werden, wenn man die Stromstärke in dem primären Leiter ändert. Die Aufgabe nun, die Geschwindigkeit zu bestimmen, mit der sich die Induktionswirkung vom primären Leiter zum sekundären fortpflanzt, ist die eben genannte.

Wenn man eine Leydener Flasche entladet, so strömt nicht in einem Momente die ganze positive Elektricitätsmenge zur negativen, sondern es erfolgen in sehr kleinen Intervallen viele Entladungen, die immer schwächer werden. Diese Entladungen gehen abwechselnd von der positiven Belegung zur negativen und umgekehrt. Wir erhalten also elektrische Schwingungen oder Oscillationen (Hin- und Herwogen der Elektricität, oscillierende Entladung). Die Ursache dieser Erscheinung ist die Entstehung von Extraströmen (Selbstinduktion). Die Zeit, die zwischen einer Umkehrung des Stromes und der folgenden liegt, wird die Periode der elektrischen Oscillation genannt. Die Periode ist sehr klein, bei der oscillierenden Entladung einer Leydener Flasche etwa eine millionstel Sekunde. Die Grösse der Schwingungsperiode kann man in jedem ge-

*) Die Versuche von Hertz und Tesla gehören zwar nicht zu den „Anwendungen“ der Elektricität; wir wollten sie aber nicht von der Funkentelegraphie trennen.

gebenen Falle, wie Kirchhoff gezeigt hat, berechnen; sie hängt ab von der Kapacität des Kondensators (Leydener Flasche etc.) und der Grösse der Selbstinduktion.

Solche elektrische Schwingungen entstehen nun auch, wenn man zwischen zwei mit den Polen eines Induktionsapparates verbundenen Drähten Funken überspringen lässt. Jede Entladung, d. h. jeder überspringende Funke, giebt zu Schwingungen Veranlassung. Die Schwingungsperiode ist aber jetzt wegen der sehr grossen Selbstinduktion der sekundären Spule viel grösser als eben, sagen wir $^1/_{10000}$ Sekunde. (Wenn also der Vorgang einer Entladung eine Sekunde dauerte — in Wirklichkeit dauert eine Entladung nur einen Bruchteil einer Sekunde —, so würde die Elektricität 10 000 mal hin- und herwogen, d. h. es würden 10 000 Schwingungen entstehen.)

Um elektrische Schwingungen von kleiner Periode zu erhalten, kann man eine Versuchsanordnung benutzen, die in Fig. 113 schematisch dargestellt ist. *S* sei die sekundäre

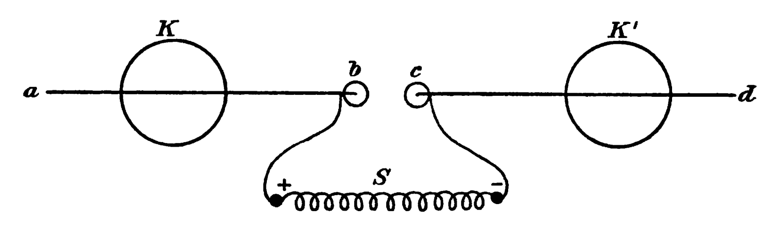


Fig. 113.

Spule eines Induktionsapparates; die Pole des Induktoriums sind mit zwei geradlinigen dickeren Drähten *a b* und *c d* verbunden, die in Kugeln endigen. Um die Kapacität zu vergrössern, sind zwei grosse Messingkugeln mit den Leitern verbunden. Wenn der Induktionsapparat in Thätigkeit ist, springen Funken zwischen *b* und *c* über. Bei dieser Anordnung wogt die Elektricität nur in den geradlinigen Leitern hin und her, da die Spule *S* wegen der sehr grossen Selbstinduktion der Elektricität einen grösseren Widerstand entgegensetzt, als die Luftschicht zwischen *b* und *c*. „Die Oscillationen, die

in etwa dem hundertmillionsten Teil einer Sekunde aufeinanderfolgen, finden bei jedem Öffnungsfunken statt" (Grätz, Die Elektricität und ihre Anwendungen). Die eben beschriebene Vorrichtung nennt Hertz den primären Leiter (*ab* und *cd* nebst den grossen Messingkugeln).

Die elektrischen Schwingungen in dem primären Leiter verursachen nun Schwingungen des Äthers ausserhalb des primären Leiters. Dieser ist ein hypothetischer, sehr feiner und elastischer Stoff, der zur Erklärung der Lichterscheinungen von den Physikern herangezogen wird. Der Äther erfüllt den ganzen Weltraum (auch das Innere der Körper, d. h. die Zwischenräume zwischen den einzelnen Molekülen). Die elektrischen Wellen oder die Wellen elektrischer Kraft pflanzen sich mit grosser Geschwindigkeit in dem Raume fort. Um ihre Existenz in der Umgebung des primären Leiters nachzuweisen, bediente sich Hertz eines sogenannten elektrischen Resonators oder sekundären Leiters. Dieser besteht aus einem Drahtkreise (Fig. 114), der durch eine kleine Funkenstrecke unterbrochen ist. Treten die elektrischen Wellen in den sekundären Leiter ein, so zeigen sich an der Unterbrechungsstelle kleine Fünkchen.

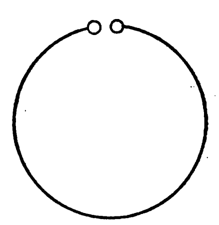


Fig. 114.

Treffen die elektrischen Wellen eine feste Metallwand, so werden sie an der Wand reflektiert, und es bilden sich stehende Wellen elektrischer Kraft. (Stehende Wellen erhält man, wenn man gegen ein gespanntes Seil einen senkrechten Schlag ausführt.) Die von dem primären Leiter ausgehenden Wellen schneiden die reflektierten; es entstehen Knotenpunkte und Bäuche (Fig. 115, S. 148). In den Knotenpunkten *K* ist die elektrische Kraft Null, in den Bäuchen ist sie am grössten. Es gelang nun Hertz mit Hülfe seines sekundären Leiters (dem elektrischen Auge) die Existenz der Knotenpunkte und Bäuche nachzuweisen (keine Funken in den Knotenpunkten, die stärksten Fünkchen in den Bäuchen) und die Entfernung zwischen einem Knotenpunkte und dem nächsten Bauche zu messen (2,4 m). Diese Entfernung ist aber, wie

man aus der Fig. 115 ersieht, gleich dem vierten Teile einer elektrischen Welle.

Wie viele Schwingungen in dem primären Leiter, also auch in seiner Umgebung, in 1 Sekunde entstehen, kann man, wie oben angedeutet wurde, leicht berechnen, und damit sind alle Stücke zur Berechnung der Fortpflanzungs-

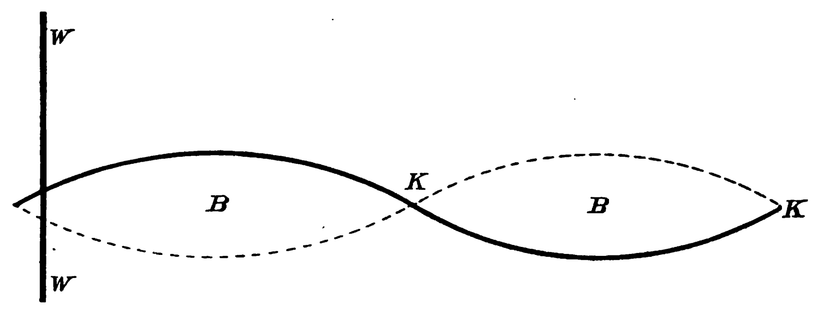


Fig. 115.

geschwindigkeit der elektrischen Wellen gegeben. Ist nämlich v die zu suchende Grösse, λ die Wellenlänge und n die Schwingungszahl oder die Anzahl der Wellen in einer Sekunde, so ist

$$v = n \cdot \lambda.$$

Für λ fand Hertz $4 \cdot 2{,}4 = 9{,}6$ m und für n den Wert $\frac{100\,000\,000}{3{,}1}$. Die Berechnung ergiebt $v = 310\,000$ km. Mit derselben Geschwindigkeit pflanzt sich aber auch das Licht im Raume fort. Aus dieser Ubereinstimmung folgt, dass die elektrodynamischen Wellen sich gerade so wie die Lichtwellen durch den Äther fortpflanzen müssen (wir hatten dieses eben schon, ohne dass es bewiesen war, angenommen). Die elektrischen Wellen und die Lichtwellen unterscheiden sich nur durch die Grösse der Wellenlänge. Die roten Lichtstrahlen haben eine Wellenlänge von 0,0008 mm, die Wellenlänge der violetten Strahlen ist ungefähr halb so gross. Die elektrodynamischen Wellen sind ungleich länger (einige Centimeter bis Meter).

Es gelang nun Hertz auch der experimentelle Nachweis, dass für die elektrischen Wellen dieselben Gesetze gelten wie

für die Lichtwellen: Reflexion (die berühmten Spiegelversuche), Brechung, Interferenz und Polarisation wurden nachgewiesen.

„Wir haben,“ sagt Hertz auf Seite 196 des oben citierten Werkes, „die von uns untersuchten Gebilde als Strahlen elektrischer Kraft eingeführt. Nachträglich dürfen wir dieselben vielleicht auch als Lichtstrahlen von sehr grosser Wellenlänge bezeichnen. Mir wenigstens erscheinen die beschriebenen Versuche in hohem Grade geeignet, Zweifel an der Identität von Licht, strahlender Wärme und elektrodynamischer Wellenbewegung zu beseitigen. Ich glaube, dass man nunmehr getrost die Vorteile wird ausnutzen dürfen, welche sich aus der Annahme dieser Identität sowohl für das Gebiet der Optik, als das der Elektricitätslehre ziehen lassen.“

Tesla: Wechselströme grosser Frequenz und hoher Spannung. Bei den meisten neueren Wechselstrommaschinen beträgt die Periode $^1/_{50}$ Sekunde, d. h. in jeder Sekunde erfolgen 100 Umkehrungen der Stromrichtung. Leiten wir also Wechselströme durch eine Drahtspule, so muss diese Spule eine sehr starke Induktionswirkung ausüben; es werden in benachbarten Drähten starke elektrische Ströme erregt (Wechselströme). Wenn man nun die Anzahl der Stromumkehrungen oder die Frequenz des primären Stromes noch vergrössert, etwa verdoppelt, so wird die Induktionswirkung der Spule stark steigen. Wir erhalten nämlich in der sekundären Spule zunächst doppelt so viele Stromimpulse wie eben; es kommt aber noch hinzu, dass jetzt jeder Stromimpuls stärker ist wie eben, da ja die Änderungen der Intensität des primären Stromes schneller erfolgen und von der Geschwindigkeit, mit der die Stromänderungen vor sich gehen, die Induktionswirkung abhängt (s. S. 76). Nun können wir die Frequenz dadurch vergrössern, dass wir eine Leydener Flasche durch Wechselströme laden und sich entladen lassen. Wir erhalten dann, wie wir gesehen haben, bei jeder Entladung eine Reihe von Stromimpulsen. Dasselbe erreichen wir natürlich auch, wenn wir einem Induktionsapparate die Rolle übergeben, die Ladung der Leydener Flasche zu besorgen.

Die Hochfrequenzströme, die Tesla so erhielt, änderte er nun in Ströme von ausserordentlich hoher Spannung um, indem er sie transformierte.

In Fig. 116 ist eine schematische Darstellung einer Versuchsanordnung gegeben. P_1, P_2 sind die sekundären Pole eines grossen Induktionsapparates. Diese sind durch Drähte mit den inneren Belegungen zweier Leydener Flaschen L verbunden. Die äusseren Belegungen werden daher entgegengesetzt elektrisch geladen. Die primäre Spule *Pr* eines Transformators (man benutzt wegen der hohen Spannungen sogenannte Öltransformatoren) ist durch Drähte, in die eine kleine Funkenstrecke eingeschaltet ist, mit den äusseren Belegungen verbunden. Wird nun das Induktorium in Thätigkeit gesetzt, so springen zwischen den Kugeln K Funken über. In der primären Spule des Transformators erhalten wir also Wechselströme sehr hoher Frequenz. Diese induzieren in der sekundären Spule des Transformators Wechselströme sehr hoher Spannung (eine Spannung, die einige 100000 Volt beträgt); wir erhalten also in der sekundären Spule Wechselströme grosser Frequenz und sehr hoher Spannung.

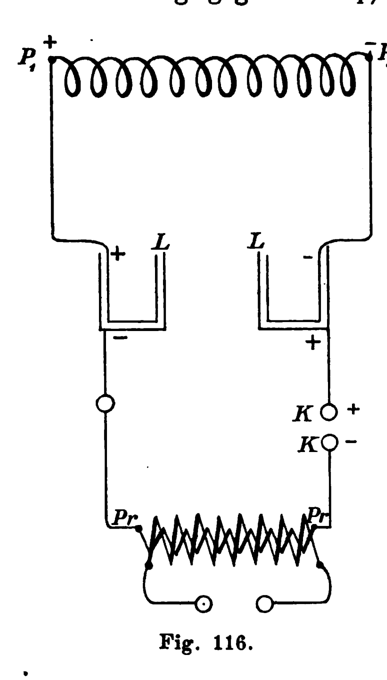


Fig. 116.

Höchst interessant sind die Lichterscheinungen, die durch die hochgespannte Elektricität verursacht werden. Aber es würde uns zu weit führen, wenn wir auf die zahlreichen Experimente, die man mit den hochgespannten Strömen anstellen kann, eingehen wollten. (Näheres hierüber findet man in einer Broschüre von P. Spies: Tesla's Licht der Zukunft, Berlin

1895, Verlag von H. Paetel.) Wir begnügen uns hier mit einigen Andeutungen: Aus den Polen der sekundären Spirale brechen blaue Lichtbüschel hervor, ebenso aus Drähten, die man mit den Polen des Transformators verbindet. Zwei Drähte, die an den Transformatorpolen befestigt sind, ergeben, parallel zu einander ausgespannt, bei nicht zu grossem Abstande (10 bis 20 cm) prachtvolles Büschellicht; die Strahlen schiessen von dem einen Poldrahte zum anderen und bilden ein bläulich weisses Lichtband. Verbindet man zwei parallele, vertikal stehende Metallplatten mit der sekundären Rolle des Transformators, so leuchten evacuierte Röhren ohne Zuleitungsdrähte (sogenannte Teslaröhren), wenn man sie zwischen die Platten bringt, hell auf etc. Ob das Tesla-Licht das Licht der Zukunft werden wird, ist zwar unwahrscheinlich, aber nicht unmöglich.

Funkentelegraphie*). Die erste Übersetzung der Hertz'schen Versuche aus dem Laboratorium in die Praxis ist die Funkentelegraphie, die man auch die Telegraphie ohne Draht nennt (bezeichnender wäre der Ausdruck: Telegraphie ohne Fernleitung).

Wie wir gesehen haben, verursachen die elektrischen Wellen in entfernten Leitern Induktionswirkungen. Diese sind bei grösserer Entfernung mit Hülfe der Hertz'schen Resonatoren nicht mehr nachweisbar. Marconi, ein junger Italiener, ersetzte den Hertz'schen Resonator durch ein viel empfindlicheres „elektrisches Auge", den sogenannten Kohärer oder Fritter. Dieser besteht aus einer Glasröhre (s. Fig. 117, S. 152), in der sich eine dünne Schicht ($^1/_2$ bis 1 mm dick) kleiner, scharfkantiger Metallkörner (Nickelfeilicht) befindet. Durch die Enden der Röhre gehen Zuleitungsdrähte hindurch, an denen, damit ein guter Kontakt hergestellt werde, Silberkölbchen angelötet sind. Wird der Fritter elektrisch bestrahlt, so springen zwischen den Körnchen sehr viele kleine Fünkchen über; es bilden sich Metalldämpfe, die eine leitende Brücke von einem Körnchen zum andern herstellen. Diese Brücke bleibt nach der Be-

*) Eine ausführliche Darstellung findet man in: Die Funkentelegraphie von A. Slaby, Berlin 1897, Verlag von L. Simion.

strahlung, da die Dämpfe sich als Metallstäubchen niederschlagen, gewöhnlich bestehen; ein leiser Schlag gegen die Röhre genügt aber, den Einsturz der Brücke herbeizuführen.

Treffen wir nun die durch die Fig. 117 erläuterte Anordnung (*G* ist ein Galvanometer, *E* ein Trockenelement, *F* der Fritter), so ist, wenn der Fritter nicht bestrahlt wird, der Widerstand in ihm so gross, dass der Strom des Elementes nicht durch die Körnerschicht hindurchgehen kann. Gehen aber elektrische Wellen durch den Fritter hindurch, so wird die Brücke hergestellt, der Strom ist geschlossen, und die Galvanometernadel schlägt aus.

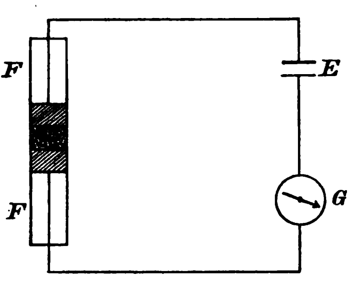


Fig. 117.

Das Galvanometer ersetzte Marconi durch ein empfindliches Relais (s. S. 114). Dieses schliesst, wenn der Fritter anspricht, einen zweiten Stromkreis (Ortsbatterie oder Lokalbatterie), in den ein Morseapparat und der sogenannte Klopfer eingeschaltet sind (Slaby schaltet Klopfer und Schreibapparat parallel). Der Klopfer besteht aus einem Elektromagnet, der einen Anker anzieht. An dem Anker ist ein kleiner Hornklöppel befestigt, der, sobald der Strom der Ortsbatterie geschlossen ist, einen Schlag gegen den Kohärer ausführt.

Der S t r a h l a p p a r a t besteht aus zwei massiven Messingkugeln von ca. 10 cm Durchmesser (Fig. 118), die einen Abstand von etwa 2 mm haben. Durch Öl (Vaselinöl), das sich in einer cylindrischen Pergamenthülle befindet, ist der Zwischen-

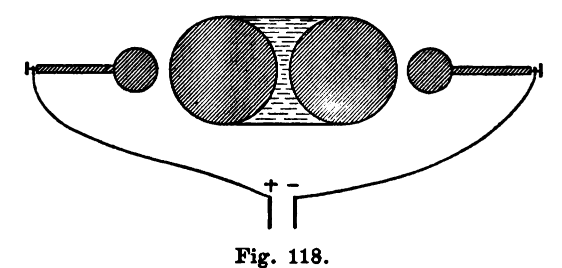


Fig. 118.

raum zwischen den Kugeln ausgefüllt. Die Funken schlagen also durch die Ölschicht hindurch, wodurch die Wirkung erhöht wird. Zu dem Strahlapparat gehören noch zwei kleine massive Messingkugeln, die von den grossen etwa 10 mm abstehen. Die kleinen Kugeln werden mit den sekundären Polen eines kräftigen Induktionsapparates verbunden. Um den Strom der Batterie, die den Induktionsapparat in Gang setzt, bequem unterbrechen und schliessen zu können, schaltet man vor die primäre Spule des Induktoriums einen Morsetaster ein.

Die Funkentelegraphie spielt sich nun folgendermassen ab. Durch einen Druck auf den Morsetaster wird das Induktorium in Thätigkeit gesetzt; zwischen den Kugeln des Strahlapparates springen Funken über, die elektrischen Wellen durcheilen nach allen Richtungen den Raum, treffen den Fritter der Empfangsstation, durch diesen wird dann der Stromkreis der Ortsbatterie an der Empfangsstation geschlossen, Morseapparat und Klopfer treten in Thätigkeit, durch einen Schlag des Hornklöppels wird die Brücke im Fritter zerstört, und es kann die Aufnahme eines neuen Signals erfolgen.

Wenn das Relais ausgeschaltet wird, entstehen Fünkchen, die ebenfalls Wellen aussenden, also den Kohärer sofort wieder einschalten können. Diese Fünkchen müssen unterdrückt werden. Eine sinnreiche Schaltung von Dr. Spies macht die Anwendung von Nebenschlüssen von hohem Widerstande (Marconi) zur Unterdrückung der Fünkchen überflüssig. Bei dieser Anordnung bleiben die Ströme des Morseapparates u. s. w. für gewöhnlich geschlossen und werden beim Ansprechen des Kohärers unterbrochen.

Die Entfernung, die die Funkentelegraphie überwinden kann, wird dadurch ausserordentlich vergrössert, dass man die eine Speisekugel des Strahlapparates durch einen Draht mit der Erde leitend verbindet und die andere mit einem langen, vertikal gespannten isolierten Drahte verbindet. Der lange Draht wirkt „wie das durchlöcherte Rohr eines Sprengwagens, aus ihm spritzen gleichsam die Strahlen elektrischer Kraft nach allen Seiten senkrecht zum Draht“. Die Aufnahmefähigkeit des Fritters wird dadurch erhöht, dass man eine Erdleitung und eine lange Luftleitung herstellt (also wie beim Strahlapparat).

Da die vertikalen Drähte „sich gegenseitig sehen müssen“, so hängt die Entfernung, auf die hin man eine Verständigung erzielen kann, wesentlich von der Länge der Drähte ab.

Dass die Funkentelegraphie der Stromtelegraphie ernste Konkurrenz macht, ist kaum anzunehmen. Es stehen nämlich der Funkentelegraphie ähnliche Hindernisse im Wege wie der Lichttelegraphie: Die Intensität der elektrischen Strahlen nimmt mit dem Quadrate der Entfernung ab; Berge, Wälder, ja einzelne Bäume, Häuser, Rauchwolken etc. hindern die Ausbreitung der elektrischen Wellen, über eine gewisse Länge der senkrechten Drähte kommt man nicht hinaus etc.

Die grösste Entfernung, die man bis jetzt (Juli 1898) in ausgesuchtem Gelände überwunden hat, beträgt 21 km; hierbei betrug die Länge des an einem Fesselballon befestigten vertikalen Drahtes des Strahlapparates 300 m.

54. Aufspeicherung der Energie — Akkumulatoren *).

Durch die Erfindung der Akkumulatoren ist die höchst wichtige Aufgabe gelöst, Energie in Form elektrischer Energie aufzuspeichern, um sie später nach Bedarf verwerten zu können.

Wenn man zwei Bleiplatten als Elektroden eines Wasserzersetzungsapparates benutzt und den Strom einer Batterie (von zwei Bunsen'schen Elementen) durch den Apparat schickt (Fig. 119), so wird an P_1 Sauerstoff und an P_2 Wasserstoff frei. Der Sauerstoff verbindet sich mit Blei zu Bleisuperoxyd (PbO_2), während der Wasserstoff das Bleioxyd, das sich, wenn die Platte an der Luft gestanden, gebildet hat, zu metallischem Blei reduziert. Die beiden Platten werden also an der Oberfläche verändert. In der Zelle entsteht infolge dessen ein Polarisationsstrom, dessen Stärke bis zu 2,5 Volt wachsen kann. Dadurch, dass man

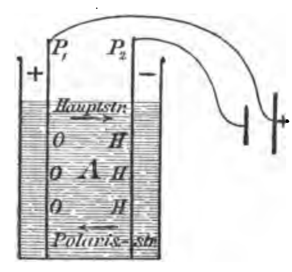


Fig. 119.

*) Von accumulare = ansammeln abgeleitet.

den Ladestrom abwechselnd längere Zeit in der einen und dann in der anderen Richtung durch die Zelle schickt, wird die Oberfläche der Platten aufgelockert. Diese Behandlung, die in den Fabriken erfolgt, nennt man Formation.

Selbstverständlich kann man einen Akkumulator nur durch Gleichstrom laden. Wechselströme muss man durch einen besonderen Apparat (Gleichrichter) in Gleichströme umwandeln.

Unterbricht man, nachdem der Ladestrom einige Stunden durch die Zelle geflossen ist, den Stromkreis, so haben wir ein galvanisches Element — sekundäres Element.

Es befinden sich nämlich jetzt Bleisuperoxyd und Blei in verdünnter Schwefelsäure.

Entladet man das sekundäre Element, so fliesst der Entladestrom in entgegengesetzter Richtung wie der Ladestrom.

Natürlich werden jetzt wieder Wasserstoff und Sauerstoff frei. Der Wasserstoff entwickelt sich jetzt aber an der Platte, an der bei der Ladung Sauerstoff frei wurde (also an P_1); das Bleisuperoxyd wird also reduziert (Reduktion ist die Entziehung von O): es verbindet sich Wasserstoff mit einem Atom O des PbO_2 zu Wasser. An der negativen Platte oxydiert freier Sauerstoff Blei zu Bleioxyd (PbO). Die Zelle hört auf, ein galvanisches Element zu sein, wenn sich die Oberflächen der Platten in Bleioxyd umgewandelt haben.

Die Spannung eines geladenen Akkumulators sinkt, ohne dass eine Entladung erfolgt, bald bis zu 2,1 Volt (Verschwinden der Gaspolarisation). Auf dieser Höhe hält sich die Spannung lange Zeit, wenn der Akkumulator keinen Strom abgiebt. Bei der Entladung sinkt die Spannung zuerst ziemlich schnell (bis zu ca. 2 Volt), dann langsamer (etwa bis 1,9 Volt), dann wieder rascher. Man entladet nur bis zu 1,8 Volt, da, wenn diese Spannung erreicht ist, die Spannungsabnahme sehr schnell erfolgt und ausserdem weitere Entladung dem Akkumulator schädlich ist.

Die Akkumulatoren spielen bei elektrischen Beleuchtungsanlagen und elektrischen Strassenbahnen eine sehr grosse Rolle. Aus diesem Grunde wollen wir ihnen noch eine etwas eingehendere Betrachtung widmen.

Bei der Ladung darf die Stromstärke oder Stromdichtigkeit eine gewisse, von der Grösse und Beschaffenheit der Platten abhängige Grösse nicht überschreiten. Denn es hängt ja die Menge der in einer Sekunde entwickelten Gase, H und O, von der Stromstärke ab. Es kann ferner in jeder Sekunde nur eine bestimmte Menge Wasserstoff und Sauerstoff auf ein Quadratcentimeter Plattenoberfläche chemisch einwirken. Werden überschüssige Gase entwickelt, so entweichen dieselben nutzlos. Die Fabriken geben daher bei jeder einzelnen „Type" die maximale Ladestromstärke an.

Die Vorgänge im Akkumulator während der Ladung sind nicht so einfach, wie wir bis jetzt angenommen haben. Wenn nämlich eine formierte positive Platte der Einwirkung von Schwefelsäure ausgesetzt ist, so scheidet sich Sauerstoff aus, und es bildet sich Bleisulfat. Durch die Thätigkeit des Stromes wird das Bleisulfat zerlegt und es bilden sich Schwefelsäure und Blei. Blei verbindet sich mit O_2 zu PbO_2. Es wird daher während der Ladung das specifische Gewicht der Säure grösser. Man kann also mit Hülfe eines Aräometers prüfen, wie weit die Ladung fortgeschritten ist.

Da nach dem Ohm'schen Gesetze die Stromstärke von der elektromotorischen Kraft und dem Widerstande abhängig ist, so kann man einen geladenen Akkumulator mit den verschiedensten Stromstärken entladen. Eine gewisse maximale Entladestromstärke darf man aber nicht überschreiten; diese ist im allgemeinen gleich der maximalen Ladestromstärke. Da eine Uberschreitung der maximalen Entladestromstärke dem Akkumulator schädlich ist, so muss man beim Experimentieren ausser einem Ampèremeter einen veränderlichen Widerstand in den Stromkreis einschalten (Kurbelrheostat).

Aus dem Vorigen ergiebt sich, dass man um so mehr elektrische Energie in einem Akkumulator aufspeichern kann, je grösser die Plattenoberflächen sind. Wenn wir nun beispielsweise einer Platte von 10 cm Breite und 20 cm Länge einmal eine glatte und ein anderes Mal eine rauhe Oberfläche geben, so ist im letzteren Falle die gesamte Oberfläche grösser als im ersten Falle. Das Bestreben der Fabriken geht daher dahin,

bei möglichst kleinen Dimensionen der Platten dem Strome möglichst viele Angriffspunkte zu bieten. Dies wird dadurch erreicht, dass man eine poröse oder schwammige Masse auf die Platten aufträgt, oder dadurch, dass man die Oberfläche der Platten mit Rippen, Rauhigkeiten, Zähnen etc. versieht.

Am verbreitetsten sind in Deutschland die Tudor-Elemente und die Elemente der Akkumulatoren-Werke System Pollak. In Fig. 120 sind vier Plattenabschnitte

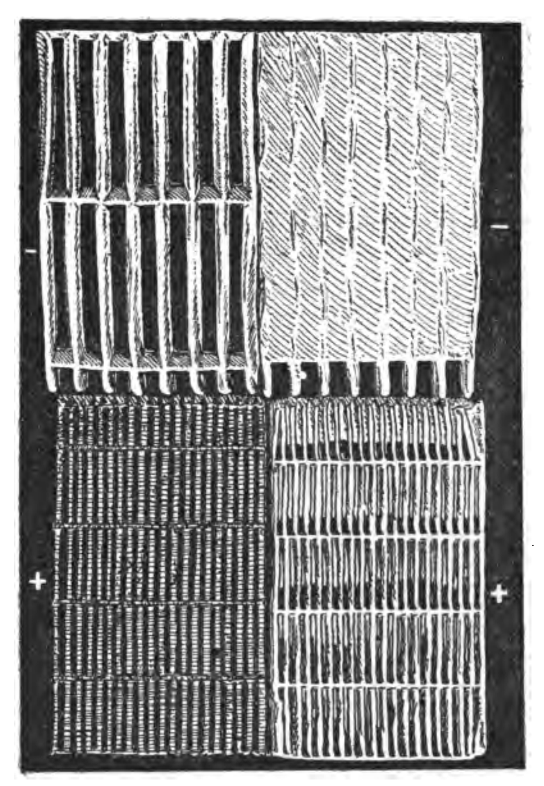


Fig. 120.

der Akkumulatoren-Fabrik Hagen i. W. (System Tudor) abgebildet. Rechts unten sehen wir die positive Platte nach dem Gusse vor der weiteren Behandlung. Die Rippen befinden sich auf beiden Seiten der Platte. Links unten

erblicken wir die positive Platte fertig formiert. Sie hat eine braunrote Farbe, weil die ganze Oberfläche mit Bleisuperoxyd bedeckt ist. Links oben ist ein Stück einer negativen Platte abgebildet. Die Rippen haben grössere Abstände von einander und sind durchgehend. In die Zwischenräume wird poröser Bleischwamm eingetragen (rechts oben). „Die ganze Masse zeigt hier ein blättriges oder körniges Gefüge, wodurch die Oberfläche ungemein vergrössert wird".

Bei den Akkumulatoren für stationäre Zwecke (Gegensatz: transportable Akkumulatoren) der Akkumulatoren-Werke System Pollak Frankfurt a. M. dienen als Elektroden viereckige Platten aus reinem metallischem Blei.

„Die Herstellung erfolgt in der Weise, dass Bänder aus Walzblei zuerst durch ein Walzwerk eigener Konstruktion gehen." Dadurch werden gewisse Muster in das Blei eingewalzt (Fig. 121). Durch Längs- und Querrippen wird die

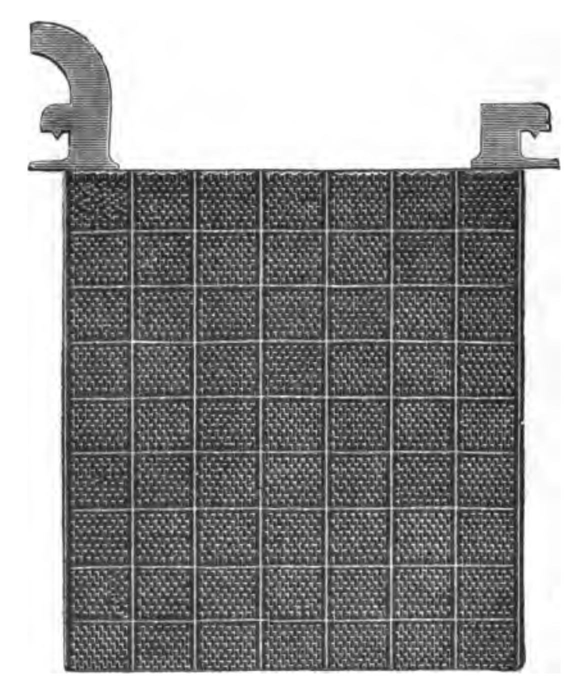


Fig. 121.

Platte in quadratische Felder eingeteilt; auf jedem Felde erheben sich nahe zusammenstehende Zähne oder Zapfen. Die Vertiefungen (die Felder) werden mit porösem metallischem Blei ausgefüllt nach einem besonderen patentierten Verfahren.

Unter der Kapacität eines Akkumulators versteht man die Elektricitätsmenge, gemessen in Ampèrestunden (= derjenigen Elektricitätsmenge, die in einer Stunde durch einen Querschnitt der Leitung fliesst, wenn die Stromstärke 1 Ampère beträgt), die der Akkumulator abgeben kann. Beispiel: Ein Akkumulator werde (unter Zuhülfenahme eines veränderlichen Widerstandes) mit 10 Ampère entladen, nach drei Stunden sei der Akkumulator erschöpft, d. h. seine Spannung bis zu 1,8 Volt gesunken. Seine Kapacität ist dann gleich 30 Ampèrestunden.

Die Kapacität hängt von der Grösse der Platten ab. Bei Elementen, die eine grosse Kapacität haben sollen, nimmt man nicht eine grosse positive und eine grosse negative Platte, sondern man verbindet mehrere kleinere positive Platten durch einen Bleistreifen mit einander, ebenso mehrere negative Platten, wie man aus Fig. 122 (S. 160), die ein montiertes Tudor-Element darstellt, erkennt.

Nutzeffekt oder Güteverhältnis nennt man das Verhältnis zwischen der vom Akkumulator abgegebenen und der dem Akkumulator zugeführten Energie. Beispiel: Ein Akkumulator wurde mit einer Stromstärke von 20 Ampère 6 Stunden lang geladen; die mittlere Spannung bei der Ladung betrug 2,2 Volt. Mithin war die dem Akkumulator zugeführte Energie

$$6 . 2{,}2 . 20 \text{ Wattstunden} = 264 \text{ Wattstunden.}$$

Der Akkumulator wurde mit 20 Ampère $5^1/_4$ Stunden lang entladen; die Spannung betrug im Mittel 1,94 Volt. Die vom Akkumulator abgegebene Energie betrug also:

$$5^1/_4 . 20 . 1{,}94 \text{ Wattstunden} = 203{,}7 \text{ Wattstunden.}$$

Mithin war der Nutzeffekt

$$\frac{203{,}7}{264} = 0{,}77 \text{ oder } 77\,\%.$$

Die Fabriken garantieren einen Nutzeffekt von 75—80 %.

Zellenschalter. Um die Aufgabe der Zellenschalter zu erklären, wollen wir einen bestimmten Fall herausgreifen: Eine Batterie von 50 Elementen soll durch eine Stromquelle von 100 Volt Spannung geladen werden. Da die Gegenspannung in jeder Zelle zuerst 1,8 Volt beträgt, so kann die Maschine zuerst alle Zellen laden. Ist die Spannung in jeder Zelle bis zu 2 Volt gestiegen, so ist die Gegenspannung gleich

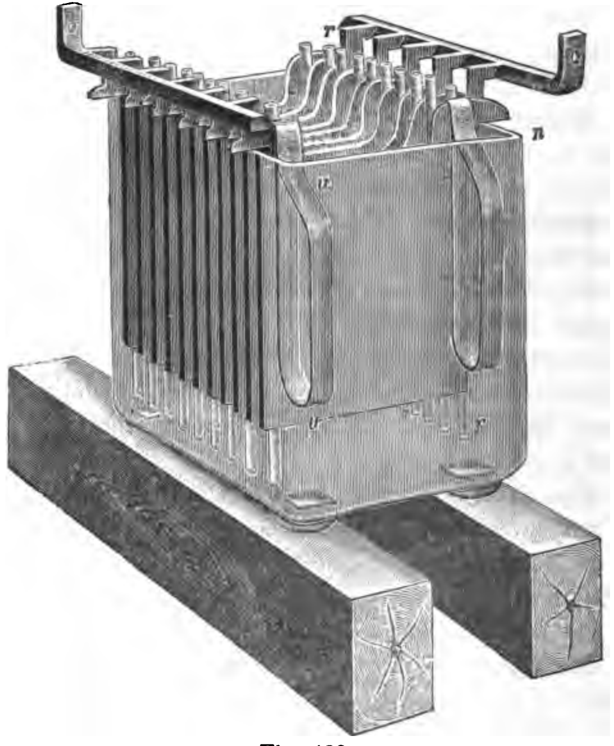


Fig. 122.

der Klemmenspannung der Maschine; es fliesst also kein Strom in die Batterie. Um daher weiter laden zu können, muss man eine Zelle abschalten. Will man also so lange laden, bis die Gegenspannung jeder Zelle 2,4 Volt beträgt, so muss man nach und nach 9 Zellen abschalten.

Ähnliches gilt, da die Spannung jeder Zelle bei der Stromentnahme sinkt, für die Entladung, wenn man konstante Spannung

(etwa 100 Volt) haben will (jetzt werden natürlich Zellen zugeschaltet).

Auch dann, wenn man eine sogenannte Hochspannungsmaschine, d. h. eine Nebenschlussmaschine benutzt, deren Klemmenspannung 40—50 % über die normale Spannung (Betriebsspannung) hinaus erhöht werden kann, sind Zellenschalter erforderlich, weil man bei der Entladung konstante Spannung haben will, daher Reservezellen zuschalten muss und bei der Ladung die letzten Zellen (die Reservezellen), die ja weniger erschöpft sind und daher früher geladen sind als die anderen, abschalten muss.

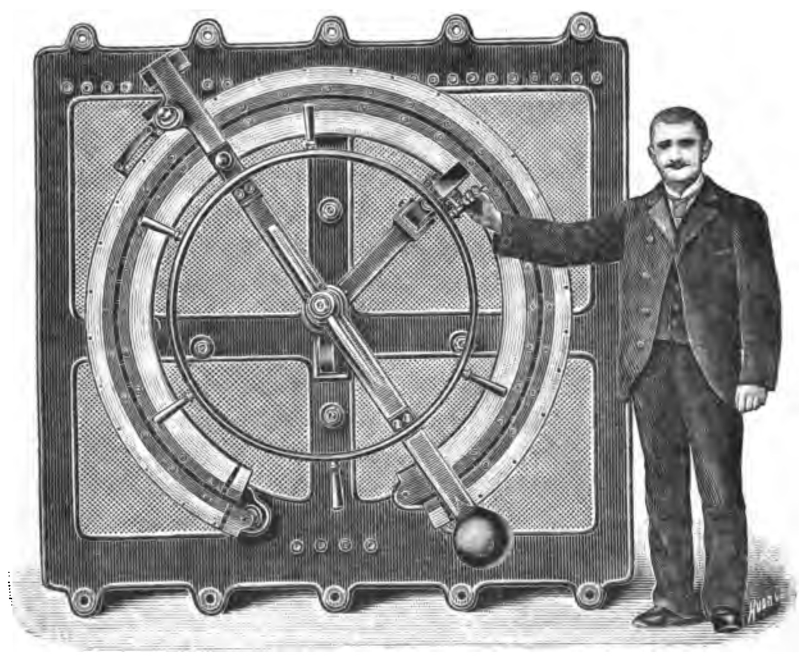


Fig. 123.

Die beiden Zellenschalter vereinigt man meistens zu einem Apparate, den man Doppelzellenschalter nennt. Ein grosser Doppelzellenschalter der Akkumulatoren-Fabrik Hagen i. W. für 26 ab- bzw. zuzuschaltende Zellen ist in Fig. 123 abgebildet. Derselbe ist für Handbetrieb beim Laden und automatischen

Betrieb beim Entladen eingerichtet. Die von einander isolierten Kontaktstücke, die mit den 26 letzten Zellen der Batterie leitend verbunden sind, liegen unter den in der Figur sichtbaren beiden Schleifringen. Diese sind mit der Lade- bzw. Entladeleitung verbunden.

Dreizehntes Kapitel.

Die Transformation des elektrischen Stromes und die elektrische Kraftübertragung.

---

55. Transformatoren.

Wenn die Entfernung zwischen dem Orte, an dem sich die Kraftquelle (z. B. eine Wasserkraft) befindet, und dem Orte, wo der elektrische Strom zur Speisung von Lampen und zum Betriebe von Motoren verwendet wird, gross ist, so muss man, wie wir früher (S. 100) gesehen haben, Ströme hoher Spannung in die Fernleitung schicken, damit der Spannungsverlust (also auch der Energieverlust) in der Fernleitung nicht einen zu hohen Procentsatz erreicht. Bei sehr grosser Entfernung zwischen Krafterzeugungs- und Kraftverbrauchsort kann man auch in Wechselstrom- und Drehstrommaschinen nicht die Spannung erzeugen, die man aus ökonomischen Rücksichten haben muss. Anderseits muss den Konsumenten ein Strom niedriger Spannung zur Verfügung gestellt werden. Um nun die Spannung des in der Maschine erzeugten Stromes zu erhöhen und den hoch gespannten Strom am Verbrauchsorte in niedrig gespannten Strom umzuwandeln, bedient man sich der Transformatoren.

Ein Transformator besteht aus einer primären und einer sekundären Wickelung (siehe Induktionsapparate). Nennen wir die Anzahl der primären Windungen p und die der sekundären Windungen s, so ist

$\frac{p}{s}$ der Transformationskoefficient.

Ist der Transformationskoefficient grösser als 1, d. h. die Anzahl der primären Windungen grösser als die Anzahl der sekundären Windungen, so ist die Spannung des sekundären Stromes (transformierten Stromes) kleiner als die Spannung des primären Stromes; ist das Verhältnis aber kleiner als 1, so hat der sekundäre Strom die höhere Spannung. Durch passende Wahl des genannten Verhältnisses kann man dem sekundären Strome eine gewünschte Spannung geben.

Um die Wirkung des Transformators zu erhöhen, nimmt man die Magnetoinduktion (s. S. 33) zu Hülfe (Fig. 124; *E* ist der Eisenkern, *p* sind die Windungen für den primären, *s* für den sekundären Strom). Die Eisenmasse des Transformators stellt man, um die Entstehung der Foucault'schen Ströme thunlichst zu verhindern, aus von einander isolierten Eisendrähten oder Eisenscheiben her.

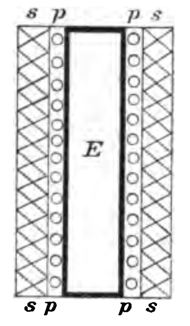


Fig. 124.

Die Eisenmasse wird durch den primären Strom magnetisiert und induziert in den sekundären Windungen ebenfalls elektrische Ströme, die mit den durch den primären Strom in den sekundären Windungen erzeugten Strömen dieselbe Richtung haben. Bei jeder Umkehrung der Richtung des primären Stromes wechseln der Nordpol und Südpol ihre Plätze.

Bei der durch die Fig. 124 veranschaulichten Anordnung müssen fast alle Kraftlinien ihren Weg durch die Luft nehmen; deshalb wird die Magnetoinduktion nicht ganz ausgenutzt — wir haben Verluste infolge magnetischer Streuung.

Die Firma Ganz & Co., die sich um die Vervollkommnung der Transformatoren grosse Verdienste erworben hat, konstruierte zuerst p o l l o s e T r a n s f o r m a t o r e n, indem sie Eisenringe statt der Eisenstäbe benutzte (geschlossene magnetische Bahnen). Ein solcher Ringmagnet wirkt wie ein offener Magnet induzierend auf die sekundären Windungen.

Bei den K e r n t r a n s f o r m a t o r e n, die eine ringförmige Gestalt haben, liegt die Eisenmasse central, es werden also die beiden Spulen auf den Kern aufgewickelt, wie es durch

die Fig. 125, die einen schematischen Querschnitt darstellt, veranschaulicht wird.

Bei den *Manteltransformatoren* umhüllt das Eisen die beiden Spiralen, bildet also den umhüllenden Mantel.

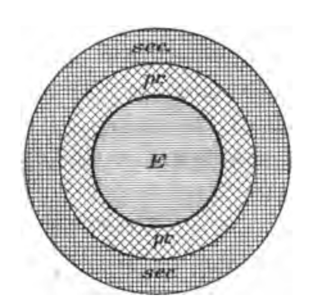


Fig. 125.

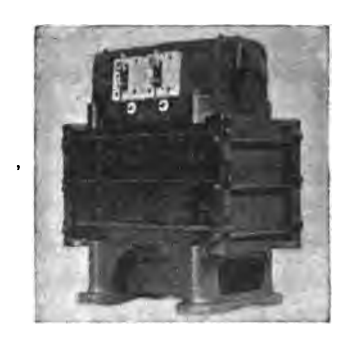


Fig. 126.

Ein Transformator für Einphasen-Wechselstrom von Schuckert & Co. ist in Fig. 126 abgebildet. Die Klemmen für den primären Strom befinden sich auf der Vorderseite, diejenigen für den sekundären Strom auf der Hinterseite des Apparates.

Da wegen der hohen Spannung, die der primäre oder sekundäre Strom hat, leicht Funken zwischen benachbarten Windungen überspringen können, so wird besondere *Sorgfalt auf die Isolation* verwendet. Bei Transformatoren, in denen sehr hohe Spannungen herrschen, betten daher die Maschinenfabrik Oerlikon und die Allgemeine Elektricitäts-Gesellschaft, Berlin alle Teile in Öl ein, da Öl ein sehr guter Isolator ist (*Öltransformatoren*).

Durch die Transformation wird der Charakter des primären Stromes nicht geändert. Transformiert man z. B. einphasigen Wechselstrom, so nimmt man an den sekundären Klemmen wieder einphasigen Wechselstrom ab. Bei mehrphasigen Wechselströmen ist für jeden Stromkreis ein Transformator erforderlich. Wollen wir also Drehströme transformieren, so müssen wir drei Transformatoren benutzen. Diese drei Transformatoren vereinigt man zu einem Apparate. Die drei Eisenkerne ver-

bindet man oben und unten durch eine Eisenplatte, um die Entstehung freier Pole zu verhindern.

Wechselströme können ohne weiteres in ruhenden Apparaten transformiert werden, da Stromrichtung und Stromstärke sich schnell ändern. Gleichströme werden in der Weise transformiert, dass man durch den niedrig (oder hoch) gespannten Strom einen Elektromotor treibt, der die Kraftquelle für eine zweite Dynamo ist, in der Ströme hoher (oder niedriger) Spannung erzeugt werden (Gleichstromumformer).

Die Transformation geht nicht ohne Energieverluste vor sich, weil 1) sowohl in der primären als auch in der sekundären Spule Joule'sche Wärme erzeugt wird, 2) die Entstehung Foucault'scher Ströme nicht ganz vermieden werden kann, 3) die Koercitivkraft des Eisens bei der Magnetisierung bald nach der einen, bald nach der anderen Richtung überwunden werden muss (Verluste infolge der Hysteresis des Eisens).

Das Verhältnis zwischen dem Effekte des sekundären und primären Stromes nennt man den Wirkungsgrad des Transformators. Beispiel: Ein Strom, dessen Spannung, gemessen an den primären Klemmen des Transformators, 1000 Volt und dessen Stromstärke 50 Ampère beträgt, habe nach der Transformation eine Spannung von 10 000 Volt und eine Stärke von 4,5 Ampère. Dann ist

der primäre Effekt 50 000 Watt,
der sekundäre „ 45 000 „ ,

der Wirkungsgrad also $\frac{45\,000}{50\,000} = 0{,}9$ oder 90 %.

Bei unseren Annahmen würde also der Energieverlust infolge der Transformation 10 % betragen.

Bei den neueren Transformatoren steigt der Wirkungsgrad bis zu 96 %.

56. Kraftübertragung.

Um die motorische Kraft einer Kraftquelle (Turbine, Dampfmaschine etc.) auf Arbeitsmaschinen zu übertragen, bedient man sich der Transmissionen. Diese Art der Kraftübertragung

ist für grössere Entfernungen wegen des verhältnismässig grossen, durch sie bedingten Kraftverlustes und starken Verschleisses der Riemen oder Drahtseile nicht anwendbar.

Die äusserst wichtige technische Aufgabe der Kraftübertragung ist durch die Elektrotechnik in der Weise gelöst worden: Durch die Wasserkraft wird ein Wassermotor (Wasserrad oder Turbine) und durch diesen eine Dynamomaschine betrieben; der erzeugte und eventuell transformierte elektrische Strom wird nach dem Kraftverbrauchsorte geleitet und dort für die Speisung von Lampen und Motoren verwertet.

Nur in wenigen Fällen wird die in der Dynamomaschine erzeugte elektrische Energie in einem Motor in mechanische Arbeit umgesetzt (reine Kraftübertragung); meistens speist eine Dynamomaschine eine Reihe von Motoren und Lampen, die parallel geschaltet sind (Kraftverteilung).

Die grossartigste (bezüglich der Entfernung) Kraftübertragung, die bis zum heutigen Tage in Europa ausgeführt worden ist, ist diejenige von Lauffen (am Neckar) nach Frankfurt a. M. Dieselbe wurde gelegentlich der Frankfurter elektrotechnischen Ausstellung (1891) vorgeführt. Die Länge des Weges, den der elektrische Strom zurücklegen musste, betrug 175 km. Die nutzbare Wasserkraft wurde auf etwa 300 PS geschätzt. 300 PS sind gleich ca. 220000 Watt. Diesem Effekte entspricht ein elektrischer Strom von 4000 Ampère und 55 Volt (4000 . 55 = 220000) oder von 2000 Ampère und 110 Volt etc. Der in Lauffen erzeugte Strom hatte eine Spannung von 55 Volt. Wollte man nun nicht mehr als 10 % Spannungsverlust in der Fernleitung zulassen, so hätte man Drähte von enormer Dicke benutzen müssen. Für 27000 Volt ist der Durchmesser zu 5 mm berechnet. Diese hohe Spannung konnte natürlich nur durch Transformation des Maschinenstromes erzielt werden.

Unsere schematische Figur 127 zeigt, wie das Problem der Kraftübertragung von Lauffen nach Frankfurt gelöst wurde. Der in der Drehstrommaschine G erzeugte Strom von 55 Volt Spannung wird vermittelst dicker Kupferdrähte in die primäre Spule des Transformators T_1 geschickt (in der Figur ist von

den drei Stromkreisen nur einer angedeutet). Der hochgespannte transformierte Strom fliesst durch die Fernleitung nach Frankfurt, wird dort durch einen zweiten Transformator T_2 auf die Gebrauchsspannung hinabtransformiert.

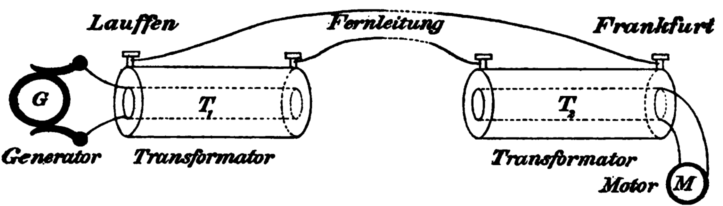


Fig. 127.

Die Verluste in der Dynamomaschine, den beiden Transformatoren und in der Fernleitung betrugen etwa 26 %, so dass 74 % der Energie, die die Turbine auf die Dynamomaschine übertrug, von den Klemmen des Frankfurter Transformators für Motorenbetrieb und Beleuchtungszwecke abgenommen werden konnten.

Kraftübertragungen auf grössere Entfernungen sind in den letzten Jahren in grosser Anzahl ausgeführt worden, da man die Vorzüge dieses Systems immer mehr hat schätzen gelernt.

Von der grössten Bedeutung ist die elektrische Kraftübertragung dadurch, dass sie es ermöglicht, ungünstig gelegene und entfernte Wasserkräfte der Industrie und dem Handwerke nutzbar zu machen. Unzählige Pferdekräfte repräsentiert das durch die Sonnenwärme emporgehobene Wasser: Wenn nur ein kleiner Bruchteil der Kraft, die das dem Meere zustrebende Wasser abgeben kann, für uns Arbeit leistet, so genügt derselbe, allerorts Licht und Kraft zu spenden.

Das Dreileitersystem. Die meisten Motoren und Lampen werden für eine Betriebsspannung von 110 Volt hergestellt. Diese Spannung ist als Fernleitungsspannung nur dann anwendbar, wenn der elektrische Strom kleinere Entfernungen (etwa bis zu $^1/_2$ km) zurücklegen muss. Um bei Anwendung von Gleichstrom grössere Entfernungen ohne zu grosse Energieverluste überwinden zu können, hat man das Dreileitersystem ausgebildet. Am einfachsten gestaltet sich dieses System, wenn

man zwei Dynamomaschinen von je 110 Volt Klemmenspannung hintereinander schaltet (Fig. 128). Man befestigt die Leitungsdrähte an die freien Klemmen und an die Verbindung zwischen den Dynamos. Es herrscht dann zwischen den beiden Aussenleitern eine Spannungsdifferenz von 220 Volt, während die

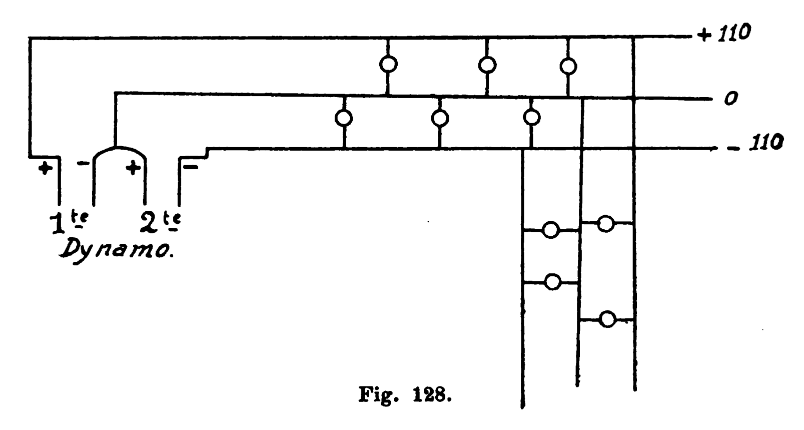


Fig. 128.

Spannungsdifferenz zwischen einem Aussenleiter und dem Mittelleiter 110 Volt beträgt. Die Lampen und Motoren müssen so verteilt werden, dass jede Netzhälfte möglichst gleich stark belastet ist.

Eine Modifikation dieses Systems besteht darin, dass man durch eine Dynamomaschine zwei hintereinander geschaltete Batterien ladet. Die Mittelleitung zweigt von der Mitte der Batterie ab.

57. Elektricitätszähler.

Die von den einzelnen Abonnenten eines Elektricitätswerkes verbrauchte elektrische Energie wird in Wattstunden gemessen. Da die Anzahl der Wattstunden das Produkt aus der Anzahl der Ampèrestunden und der Spannung ist, so genügt es, wenn im Leitungsnetze konstante Spannung herrscht, die Ampèrestunden zu messen. Die Apparate, in denen die verbrauchte elektrische Energie in Ampère- oder Wattstunden gemessen wird, nennt man Elektricitätszähler.

Die Stärke des in ein Gebäude fliessenden Stromes ist bald grösser bald kleiner, weil bald mehr bald weniger Lampen brennen. Der Elektricitätszähler muss daher möglichst oft den verbrauchten Strom in Ampèrestunden bzw. die verbrauchte elektrische Energie in Wattstunden registrieren, und zwar muss er innerhalb des ihm zugewiesenen Messbereiches für schwache und starke Ströme gleich empfindlich sein. Ferner muss der Zähler so konstruiert sein, dass ein Eingriff seitens des Abonnenten in die Thätigkeit des Apparates ausgeschlossen ist. Die Konstruktion eines guten Zählers, der allen Anforderungen gerecht wird, ist daher eine schwierige Aufgabe.

Im letzten Jahrzehnt ist eine grosse Reihe von verschiedenen Formen entstanden. Da wir uns hier damit begnügen müssen, einen Zähler zu beschreiben, so wählen wir den Elektricitätszähler von Prof. Dr. Aron, zumal Prof. Aron den ersten brauchbaren Zähler konstruiert hat und seine Zähler sehr verbreitet sind.

Das Princip der Aron-Zähler ist das folgende: Wenn ein Pendel, an dessen unterem Ende sich ein Stahlmagnet befindet (in der Fig. 129 an dem rechten), über einer Spirale schwingt, durch die ein elektrischer Strom fliesst, so ändert sich die Schwingungsdauer des Pendels, weil ausser der Schwerkraft die anziehende bzw. abstossende Kraft des Stromes auf das Pendel wirkt. Der Aronzähler älterer Konstruktion, der in der Fig. 129 abgebildet ist, besteht nun aus zwei in ihrem Gange genau übereinstimmenden Pendeluhren. Das Pendel der einen Uhr schwingt über einem Solenoide, das in die Hauptleitung eingeschaltet wird. Die beiden Uhrwerke wirken auf eine gemeinsame Walze, und zwar suchen beide die Walze in entgegengesetztem Sinne zu drehen. Es erfolgt also eine Drehung der Walze nur dann, wenn die beiden Pendel nicht

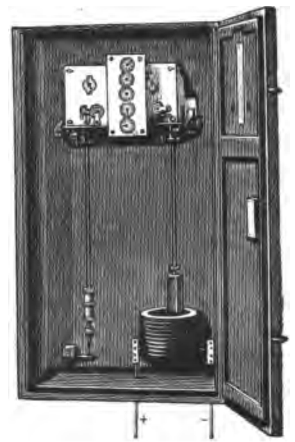


Fig. 129.

dasselbe Tempo haben. Die Gangdifferenz der beiden Uhren ist um so grösser, je grösser die Stromstärke ist. Die Bewegung der Walze wird auf Zeiger übertragen. Jeder Apparat wird so geaicht, dass man die verbrauchte elektrische Energie ablesen kann.

Bei den Aron-Zählern neuerer Konstruktion werden kurze leichte Pendel von ca. 10 cm Länge benutzt, die unbeinflusst 12 000 Schwingungen in der Stunde machen. Jedes Pendel differiert bei maximaler Belastung stündlich um ca. 2500 Schwingungen. Die beiden Pendel tragen statt einer Pendellinse an ihrem unteren Ende eine mit Kupferdraht bewickelte Spule, deren Windungen vom Strome ebenfalls durchflossen werden. Die beiden Pendelspulen nebst einem Widerstand (es soll durch die Pendelspulen ein schwacher Strom fliessen) liegen im Nebenschluss. Die beiden durch die Pendel getriebenen Uhrwerke wirken so auf ein drittes Uhrwerk, das Differentialwerk, dass letzteres die Differenz ihrer Bewegungen anzeigt.

Der neueste Aron-Zähler unterscheidet sich „von dem bisherigen dadurch, dass er

1) elektrisch aufgezogen wird,

2) dass er sehr kleine Pendel hat, so dass er selbst ohne deren Arretierung transportfähig ist und von selbst angeht, sobald die nötige Spannung vorhanden ist“ (Vervollkommneter Uhrenzähler von Prof. Dr. H. Aron; Elektrotechn. Zeitschr. 1897, Heft 26; daselbst findet man auch eine nähere Beschreibung des Mechanismus).

Der Uhrenzähler kann sowohl für Gleichstrom wie für Wechselstrom benutzt werden.

Zur Theorie: Ist n die normale, N die infolge der Stromwirkung veränderte Schwingungszahl, J die Stromstärke und C ein Konstante, so gilt für das eine Pendel, dessen Gang ein beschleunigter ist:

$$N_1 = n\left(1 + \frac{J}{C}\right)^{1/2} = n\left(1 + \frac{J}{2C} + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{2} - 1\right) \cdot \frac{J^2}{2C^2} \cdots\right)$$
$$= n\left(1 + \frac{J}{2C} - \frac{J^2}{8C^2} \cdots\right)$$

und für das zweite Pendel, dessen Gang ein verlangsamter ist:

$$N_2 = n\left(1 - \frac{J}{C}\right)^{1/2} = n\left(1 - \frac{J}{2C} - \frac{J^2}{8C^2} \cdots\right).$$

Vernachlässigt man die Glieder dritter Ordnung, so ergiebt sich $N_1 - N_2 = n \frac{J}{C}$; d. h. die Differenz der Schwingungszahlen, also auch der Gang des Differentialwerkes, ist proportional der Stromstärke.

58. Elektrische Eisenbahnen.

Von allen Anwendungen des elektrischen Stromes ist der elektrische Betrieb von Eisenbahnen eine der wichtigsten. Daher dürfte eine etwas eingehendere Betrachtung dieses Gegenstandes auch in diesem kleineren Buche angebracht sein.

Wir wissen, dass der Anker eines Elektromotors in Rotation gerät, wenn man dem Elektromotor Strom zuführt. Wird die Drehung des Ankers durch Zahnräder auf die Achse der Räder eines Wagens übertragen, so gerät der Wagen ins Rollen. Die nötige elektrische Energie kann dem Elektromotor von aussen zugeführt oder von einer Stromquelle im Wagen geliefert werden.

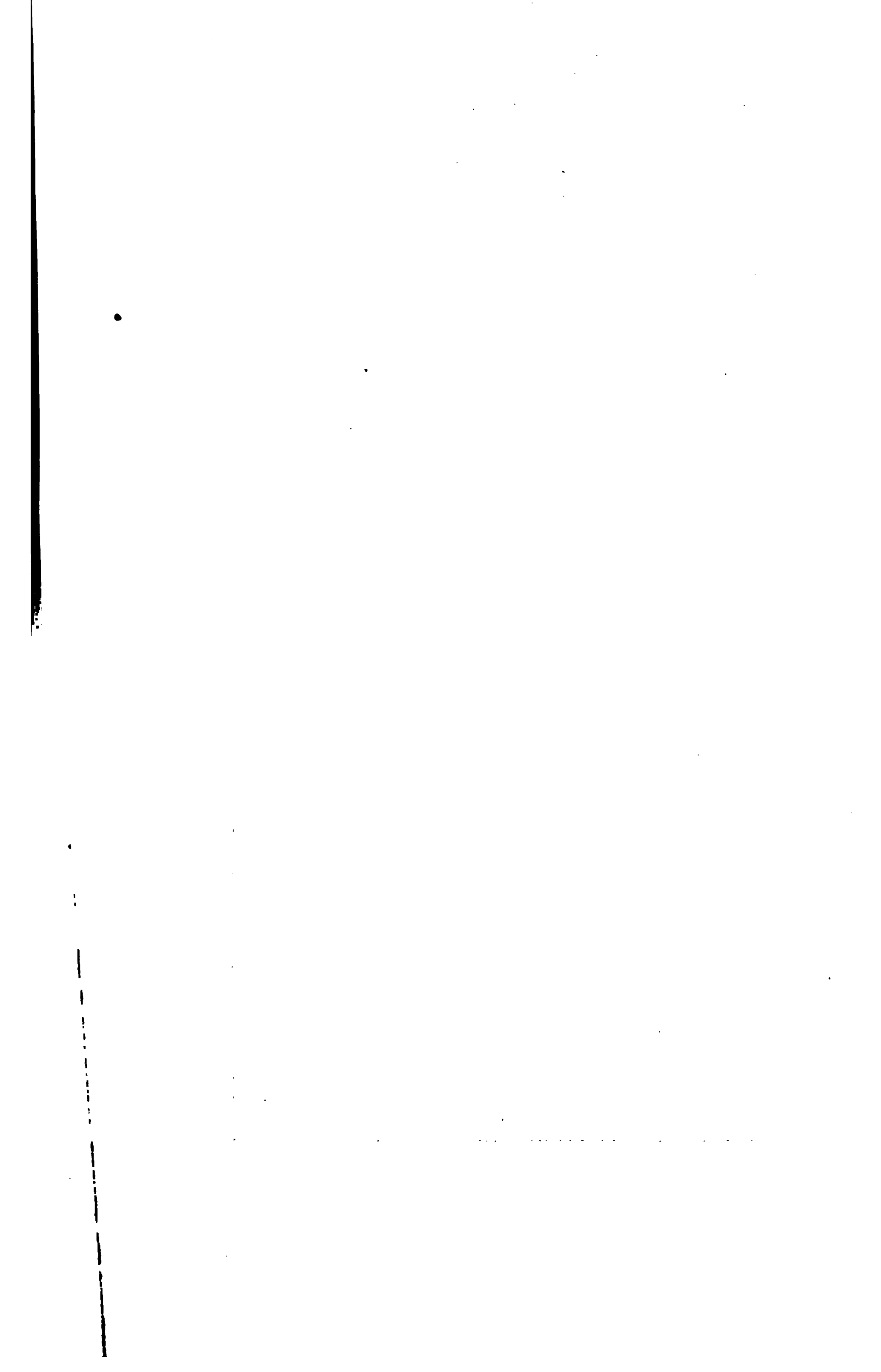
Es haben sich nun in einer verhältnismässig kurzen Zeit — die erste elektrische Eisenbahn ist von Siemens & Halske in Berlin im Jahre 1879 gebaut worden — eine grosse Reihe von verschiedenen Systemen ausgebildet, von denen wir die bekanntesten beschreiben wollen, nämlich

1) die oberirdische Stromzuführung,
2) die unterirdische Stromzuführung,
3) den Akkumulatorenbetrieb,
4) den gemischten Betrieb.

Oberirdische Stromzuführung: Dass dieses System bis jetzt für das beste gehalten wird, beweist der Umstand, dass 95 % aller elektrischen Bahnen oberirdische Stromzuleitung haben. Hier (dasselbe gilt für das System der unterirdischen Stromzuführung) haben wir es mit einer Kraftübertragung zu thun, bei der die Entfernung der primären (Dynamo, Generator) und sekundären Maschine (Elektromotor) veränderlich ist. Gerade dieser Umstand erschwerte die Lösung des Problems. In

den meisten Fällen spannt man, um dem Motor Strom zuzuführen, einen blanken Draht senkrecht über der Mitte des Schienenstranges. Auf dem Dache jedes Motorwagens ist eine Kontaktvorrichtung angebracht. Diese besteht aus einer durch Federkraft nach oben gedrückten leichten Kontaktstange, an deren oberem Ende entweder eine Rolle (amerikanische Rolle) oder nach dem System von Siemens & Halske ein Gleitbügel angebracht ist. Da der dicke Leitungsdraht dem Durchfliessen der Elektricität nur geringen Widerstand entgegensetzt, so ist die Spannung überall ungefähr dieselbe. Die Rückleitung des Stromes zum Generator übernehmen die Schienen. Die Spannung des Stromes beträgt meistens 500 Volt.

Bei Verwendung der amerikanischen Rolle muss der Leitungsdraht überall genau senkrecht über der Mittellinie der beiden Schienen liegen, er muss also allen Kurven genau angepasst sein, und den Weichen in den Geleisen müssen Luftweichen entsprechen. Da trotz der grössten Sorgfalt bei der Montage der Leitung ein Abspringen der Rolle von dem Leitungsdrahte zuweilen vorkommt, so hat die Firma Siemens & Halske die Rolle durch einen Gleitbügel ersetzt (siehe Fig. 130). Die obere Seite dieses Bügels bildet einen flachen Bogen, so dass eine nutzbare Breite von 1,2 m entsteht, auf der der blanke Leitungsdraht gleiten kann. Der Bogen (Brücke), der einen U-förmigen Querschnitt hat, ist aus Aluminium angefertigt, damit der Leitungsdraht durch die gleitende Reibung nicht abgenutzt wird. Die Brücke wird mit einem consistenten Fett angefüllt, so dass eine Schmierung des Leitungsdrahtes und der Brücke erfolgt (Verminderung der Reibung und des Verschleisses). Der Gleitbügel ist, wie man aus der Figur erkennt, auf einem leichten Rohrgestell montiert. Diese Anordnung gewährt den Vorteil einer grösseren Betriebssicherheit, indem ein Abspringen des Bügels von der Oberleitung wegen der grossen nutzbaren Breite auch bei Weichen und Kurven ausgeschlossen ist; ferner kann die Oberleitung gefälliger und einfacher gestaltet werden; endlich ist die Handhabung des Bügels einfacher als bei der Kontaktrolle, da er sich bei Änderung der Fahrrichtung selbstthätig umlegt.



Nach dem System von Sprague, das in Halle, Breslau etc. benutzt worden ist, wird von der primären Maschine aus eine Hauptleitung gelegt, die aus einem dicken Drahte besteht, der nahe oder weit von den Schienen, oberirdisch oder unterirdisch, gelegt werden kann. Von der Hauptleitung führen Querdrähte zu der sogenannten Arbeitsleitung (Fig. 131).

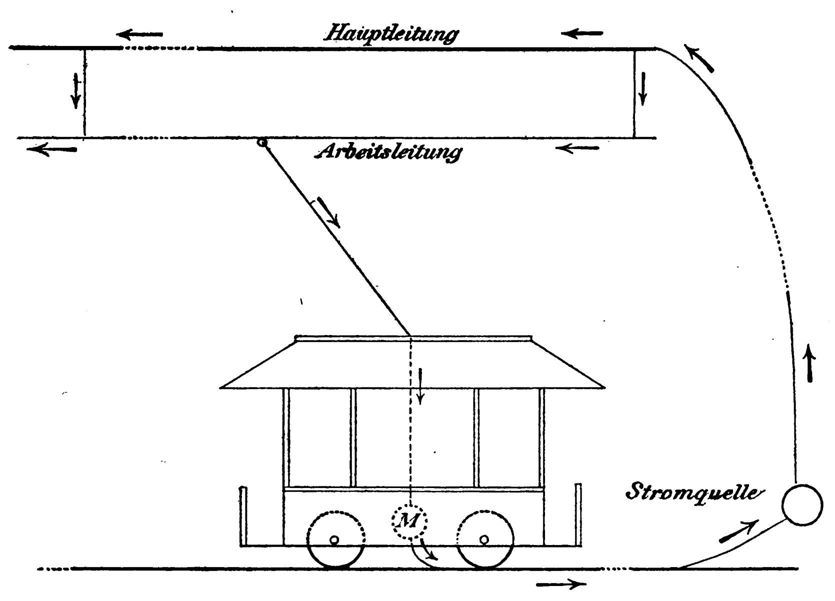


Fig. 131.

Diese besteht aus einem dünneren blanken Drahte und ist in der Nähe der Schienen über denselben angebracht. Die Zweige, die die Hauptleitung mit der Arbeitsleitung verbinden, haben eine Entfernung von 100 bis 200 m. Ein Blick auf unsere schematische Figur wird die Sache noch klarer machen.

Die Vorzüge dieses Systems bestehen darin, dass, wenn die Arbeitsleitung an irgend einer Stelle bricht, die Betriebsstörung auf eine Strecke von 100 bis 200 m beschränkt bleibt, und dass die Hauptleitung so verlegt werden kann, dass sie gegen Beschädigungen geschützt ist.

Die Hauptvorzüge*) des Systems der oberirdischen Stromzuführung bestehen darin, dass es einfach und übersichtlich ist, dass das Gewicht der Motorwagen ein nicht so grosses ist, mithin an den Ober- und Unterbau nicht so hohe Anforderungen gestellt zu werden brauchen und dass bestehende Pferdebahnstrecken leicht in Bahnen mit elektrischem Betrieb umgewandelt werden können.

Nachteile der oberirdischen Stromzuführung: Abhängigkeit aller Motorwagen von dem Generator und der Luftleitung, die Gefahren für Menschen und Tiere, die die Benutzung der hohen Spannung im Gefolge hat (bei Drahtbrüchen), Störungen des Telegraphen- und Telephonbetriebes und die Beeinträchtigung des Strassenbildes.

Bei dem System der unterirdischen Stromzuführung, das wegen der hohen Anlagekosten wenig Anklang gefunden hat, befindet sich unter der einen Schiene ein Kanal (Budapest), in dem zwei an Isolatoren befestigte Winkeleisen angebracht sind, die mit dem Generator leitend verbunden sind. Durch einen Schlitz unter der Kanalschiene geht eine Eisenplatte hindurch, an der zwei Schleifkontakte, die auf den beiden blanken Leitungen (den Winkeleisen) liegen, und die Drähte befestigt sind, die den Strom nach dem Motor hin bzw. von ihm fort führen.

Die Energiemenge, deren der Motor bedarf, ist bald grösser bald kleiner. Wenn der Wagen seine Fahrt beginnt, ist sie 5- bis 10mal so gross wie während der Fahrt auf horizontaler Strecke, bei Steigungen ist sie grösser als auf der Horizontalen etc. Der Wagenführer muss daher vermittelst einer leicht zu handhabenden Vorrichtung die Stärke des in den Motor zu schickenden Stromes regulieren können (Benutzung von Regulierwiderständen, Änderung des Übertragungsverhältnisses etc.).

Um die Generatoren zu entlasten und eine gleichmässige Beanspruchung derselben zu erzielen, wird die Benutzung von

---

*) Eine Zusammenstellung der Vor- und Nachteile, welche sich bei den verschiedenen Betriebssystemen erwiesen haben, von Ingenieur E. A. Ziffer-Wien, findet man in dem Elektrotechnischen Anzeiger XV, Nr. 77 ff.

Figur 132.

„Pufferbatterien"*) von vielen Fachleuten empfohlen, d. h. von Akkumulatorenbatterien, die parallel zu den Generatoren geschaltet sind. Bei grossem Stromconsum schickt die Batterie Strom in die Leitung, bei kleiner Belastung nimmt sie Strom auf.

Akkumulatorenbetrieb: Jeder Motorwagen ist mit einer gewöhnlich unter den Sitzbänken befindlichen Batterie ausgerüstet. Wenn der Betrieb nicht so gestaltet werden kann, dass die erschöpfte Batterie gegen eine geladene ausgewechselt werden kann, wird ihr auf der Strecke elektrische Energie zugeführt. Zu dem Zwecke befinden sich an den Anfangspunkten der einzelnen Strecken Ladeständer, die mit einer Centralstation durch Leitungen in Verbindung stehen; die Batterie wird durch ein kurzes Kabel mit dem Ladeständer verbunden. Da man den Akkumulatorenplatten für Bahnbetrieb eine sehr grosse Oberfläche giebt (ohne aktive Masse), so kann man mit grosser Stromstärke laden, also in kurzer Zeit eine grosse Energiemenge dem Akkumulator zuführen.

In Fig. 132 ist ein Motorwagen der Akkumulatoren-Fabrik Hagen i. W. abgebildet; der Wagen ist an dem einen Endpunkte seiner Linie (Courbevoie-Madeleine in Paris) angekommen; die Batterie ist mit dem Ladeständer verbunden.

Vorzüge und Nachteile dieses Systems: Unabhängigkeit aller Wagen von Leitungsdrähten und der Centralstation, Fortfallen jeglicher Leitung und der damit verbundenen Übelstände. — Durch die Batterie wird das Gewicht der Wagen um ca. 20 % erhöht, daher müssen die Wagen, Ober- und Unterbau kräftiger und solider gebaut werden und wird während der Fahrt eine grössere Energiemenge verbraucht; die Stromentnahme aus Akkumulatoren ist mit Verlusten verbunden; die Akkumulatoren verlangen sorgfältige Behandlung und Wartung.

Das gemischte System: Da wo man aus ästhetischen oder technischen Gründen eine Oberleitung nicht anbringen

*) Ein sehr glücklich gewählter Name, weil diese Batterien Stösse, die der schwankende Stromverbrauch sonst in den Maschinen hervorruft, gleichsam auffangen bezw. mildern.

will, wird der Motor durch den Strom einer Akkumulatorenbatterie (im Wagen) gespeist; an den Teilen der Strecke, die Oberleitung haben, nimmt der Motor seinen Strom aus dieser, gleichzeitig wird der Energievorrat der Batterie ergänzt. Der Wagen muss also, während er Strom aus der Leitung entnimmt, die Batterie als tote Last mitschleppen.

Eine Firma in der Schweiz hat vor einigen Jahren das Drehstromsystem bei einer elektrischen Bahn eingeführt. Dieses System erfordert mindestens zwei Leitungsdrähte und daher auch zwei Kontaktstangen. Wahrscheinlich wird dieses System, besonders wenn entfernt liegende Wasserkräfte ausgenutzt werden sollen, noch eine grosse Zukunft haben.

Anhang.

Das absolute Masssystem.

Wie auf Seite 42 auseinandergesetzt wurde, heisst „messen“ soviel wie „vergleichen“. Dasjenige, mit dem man die zu messende Grösse vergleicht, nennt man Masseinheit.

Es ist das Verdienst von Gauss und W. Weber, alle physikalischen Einheiten von drei Einheiten, nämlich der Längeneinheit, der Zeiteinheit und der Masseneinheit*) abgeleitet zu haben.

Die Längeneinheit = 1 Centimeter (c),
„ Zeiteinheit = 1 Sekunde (s),
„ Masseneinheit = 1 Gramm (g) (Masse eines Gramms).

Das Masssystem, das auf diesen Einheiten aufgebaut ist, nennt man das absolute oder C-G-S-System.

Machen wir also Berechnungen und benutzen das C-G-S-System, so haben wir in dem erhaltenen oder zu bildenden Ausdrucke für 1 m die Zahl 100 (Centimeter), für 1 kg die Zahl 1000 (Gramm) und für 1 Stunde die Zahl 3600 (Sekunden) zu setzen.

---

*) Unter der Masse eines Körpers versteht man die Menge des Stoffes, die der Körper enthält. Ein Kilogramm Wasser hat eine gerade so grosse Masse wie ein Kilogramm Eisen. — Wenn man ein bestimmtes Quantum Luft, etwa 1 g, zusammenpresst, so nimmt das Volumen ab, die Masse aber bleibt dieselbe. Wird 1 Liter Wasser von 100° in Dampf von 100° verwandelt, so entstehen ca. 1600 Liter Wasserdampf. Diese haben dieselbe Masse wie das Liter Wasser von 100°.

Einheit der Geschwindigkeit: Unter der Geschwindigkeit eines Körpers versteht man den in der Zeiteinheit von dem Körper zurückgelegten Weg. (Dies gilt nur dann, wenn sich der Körper mit konstanter Geschwindigkeit bewegt.) Ein Körper hat also die Geschwindigkeit Eins, wenn derselbe in 1 Sekunde einen Weg von 1 cm zurücklegt.

Wenn ein Eisenbahnzug mit konstanter Geschwindigkeit fährt und in 1 Stunde 70 km zurücklegt, so ist im C-G-S-System seine Geschwindigkeit $\frac{70 . 1000 . 100}{3600}$ (Centimeter pro Sekunde).

Einheit der Beschleunigung: Wenn eine konstante Kraft längere Zeit auf einen Körper einwirkt, so wächst die Geschwindigkeit des Körpers gleichmässig, d. h. in jeder Sekunde um denselben Betrag. Diesen Betrag nennt man die Beschleunigung. Beispiel: Alle Körper werden von der Erde angezogen; ein Mass für die anziehende Kraft (Schwerkraft) ist das Gewicht des Körpers. Die Geschwindigkeit eines fallenden Körpers nimmt beständig zu. Nun hat jeder frei fallende Körper — wenn man von dem Widerstand der Luft absieht — am Ende der ersten Sekunde die Geschwindigkeit 981 cm*), am Ende der zweiten Sekunde 2 . 981 cm etc. Die Beschleunigung beträgt also in diesem Falle 981 cm (pro Sekunde).

Die Beschleunigung eines Körpers ist gleich der Einheit der Beschleunigung, wenn sein Geschwindigkeitszuwachs pro Sekunde 1 cm beträgt.

Einheit der Kraft: Wenn wir sehen, dass ein Körper sich bewegt (Wirkung), so schliessen wir, dass eine Kraft (Ursache) auf ihn einwirkt oder eingewirkt hat. Wir messen eine Kraft, indem wir die Wirkung der Kraft messen. Sehen wir, dass 1 g durch eine Kraft p die Beschleunigung 10 cm und in einem zweiten Falle die Beschleunigung 20 cm erfährt, so schliessen wir, dass im zweiten die Kraft doppelt so gross ist wie im

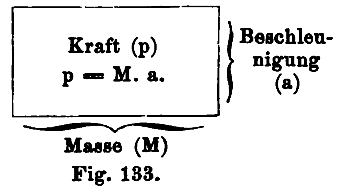


Fig. 133.

*) Wenn die Schwerkraft jetzt aufhörte zu wirken, so würde der Körper in jeder folgenden Sekunde 981 cm zurücklegen.

ersten Falle. Beobachten wir ferner, dass ein Körper, dessen Masse 2 g ist, durch eine Kraft die Beschleunigung 1 cm erfährt und dass einem Körper, dessen Masse 1 g ist, dieselbe Beschleunigung durch eine andere Kraft mitgeteilt wird, so schliessen wir, dass im ersten Falle die Kraft doppelt so gross ist wie im zweiten Falle. Bei der Messung einer Kraft (p) müssen wir also sowohl die Masse des bewegten Körpers als auch die Beschleunigung berücksichtigen (Fig. 133).

Diejenige Kraft, die der Masseneinheit (1 g) die Beschleunigung Eins (1 cm) erteilt, heisst Dyne*) (Krafteinheit).

Das Gramm kann man auch als Mass für eine Kraft ansehen. Denn unter Gramm verstehen wir gewöhnlich ein Gewicht. Das Gewicht eines Körpers aber ist ein Mass für die Schwerkraft. Um Verwirrung zu vermeiden, wollen wir, wenn wir unter Gramm die Masseinheit der Masse verstehen, sagen „Massengramm", und wenn wir Gramm als Kraft angesehen wissen wollen, uns des Ausdrucks „Kraftgramm" bedienen.

Wenn ein Gramm Messing (Massengramm) fällt, so ist die auf das Messingkörperchen (Massengramm) wirkende Kraft die Schwerkraft, also ein Kraftgramm. Diese Kraft erteilt dem Messingkörperchen die Beschleunigung 981 cm. Also ist

$$1 \text{ Kraftgramm} = 981 \text{ Dynen oder}$$

$$1 \text{ Dyne} = \frac{1}{981} \text{ g (Kraftgramm)} = 1{,}02 \text{ mg.}$$

1 Dyne ist also gleich der Kraft, mit der ein 1,02 mg schweres Körperchen von der Erde angezogen wird.

Aus dem Vorigen ergiebt sich, dass

$$1 \text{ Kraftkilogramm} = 981\,000 \text{ Dynen}$$
$$(1 \text{ Massenkilogramm} = 1000 \text{ g}).$$

Einheit der Arbeit (siehe zunächst S. 1): Da die Arbeit gemessen wird durch das Produkt aus der Kraft, die Bewegung verursacht, und dem Wege, den der Angriffspunkt der Kraft zurücklegt, so ist die Einheit der

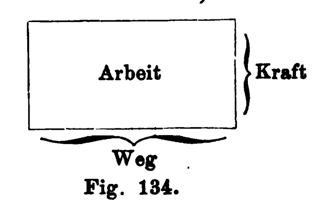


Fig. 134.

*) Von δύναμις die Kraft abgeleitet.

Arbeit diejenige Arbeit, die durch eine Kraft von 1 Dyne verrichtet wird, wenn der Angriffspunkt der Kraft einen Weg von 1 cm zurücklegt. Diese so definierte Arbeit heisst 1 Erg (von ἔργον die Arbeit). Heben wir also 1,02 mg 1 cm hoch, so leisten wir eine Arbeit von 1 Erg.

Wieviel Erg ist nun 1 Meterkilogramm? Heben wir 1 kg, so müssen wir eine Kraft von 981 000 Dynen aufwenden; der Weg beträgt 100 cm. Also ist

$$1 \text{ mkg} = 981\,000 \,.\, 100 \text{ Erg} = 981 \,.\, 10^5 \text{ Erg.}$$

Die Arbeitsleistung einer einpferdigen Maschine in 1 Sekunde ist gleich $75 \,.\, 981 \,.\, 10^5$ Ergs = $73\,575 \,.\, 10^5$ Ergs oder abgerundet $736 \,.\, 10^7$ Ergs.

Einheit des Effektes: Unter Effekt versteht man die von einer Kraft in 1 Sekunde verrichtete Arbeit. Ist also die Leistung einer Kraft pro Sekunde 1 Erg, so ist der Effekt der Kraft gleich der Einheit des Effektes. Da diese Einheit sehr klein ist, so hat man sie nicht besonders benannt; vielmehr hat man dem zehnmillionenfachen Effekt einen besonderen Namen beigelegt, nämlich Watt. Der Effekt einer einpferdigen Maschine ist, wie eben abgeleitet wurde, gleich $736 \,.\, 10^7$ Ergs.

1 HP*) oder 1 PS = $736 \,.\, 10^7$ Ergs (pro Sekunde)
1 Watt = 10^7 „ „ „

Mithin

$$1 \text{ PS} = 736 \text{ Watt.}$$

(Wegen der Verluste in der Transmission und in der Dynamomaschine erhalten wir für 1 PS niemals einen elektrischen Effekt von 736 Watt.)

Einheit des Magnetismus (Einheitspol): Die Kraft (f), mit der sich zwei Magnetpole m und m_1 anziehen, die einen Abstand von r cm haben, ist

$$f = \frac{m \,.\, m_1}{r^2}.$$

Sind die Pole zwei gleich starke Nord- oder Südpole, so ist $m = m_1$ und die Kraft, mit der die Abstossung erfolgt,

*) Vom englischen horse power.

$$f = \frac{m^2}{r^2}.$$

Ist also $f = 1$ (Dyne) und $r = 1$ (Centimeter), so ist $m^2 = 1$ und $m = 1$.

Ein Pol hat also den Magnetismus Eins (ist ein Einheitspol), wenn er einen gleich starken gleichnamigen Pol, der sich in der Entfernung 1 cm von ihm befindet, mit einer Kraft abstösst, die gleich 1 Dyne ist.

Einheit der Stromstärke: Um zu einer Einheit der Stromstärke zu gelangen, gehen wir von den Wirkungen eines Stromkreises auf einen Magnetpol aus. Diese Wirkung ist dieselbe wie die eines Magnets, den man sich senkrecht durch die Fläche des Stromkreises hindurchgesteckt denken muss. Wie stark dieser gedachte Magnet sein muss, giebt das Biot-Savart'sche Gesetz an:

„Die Kraft, die ein Stromkreis auf einen Magnetpol ausübt, ist gleich der Kraft, die ein kurzer Magnetstab auf diesen Pol ausüben würde, der senkrecht durch die Fläche des Stromkreises hindurchgesteckt ist und dessen Moment*) gleich dem Produkte aus der Stärke des Stromes und der Grösse der Stromfläche ist."

Umfliesst nun ein Strom eine Fläche von 1 qcm, und ist dann die Wirkung des Stromes auf einen Magnetpol gleich der eines Magnets, dessen magnetisches Moment gleich Eins ist (Polstärke gleich Eins, Abstand der Pole 1 cm), so ist die Stärke dieses Stromes gleich der absoluten (elektromagnetischen) Einheit der Stromstärke.

Die so definierte Einheit hat keinen besonderen Namen. Den zehnten Teil dieser absoluten Einheit der Stromstärke nennt man 1 Ampère.

Einheit der Elektricitätsmenge: Diejenige Elektricitätsmenge, die durch irgend einen Querschnitt eines Leiters in 1 Sekunde hindurchfliesst, wenn die Stärke des durch

---

*) Unter dem magnetischen Moment eines Magnets versteht man das Produkt aus der Stärke seines Nordpoles und der Entfernung seiner Pole.

den Leiter fliessenden Stromes 1 Ampère ist, nennt man 1 Coulomb.

Einheit der elektromotorischen Kraft: Der elektrische Effekt einer Stromquelle, d. h. die Arbeit, die der Strom in einer Sekunde verrichten kann, ist gleich der elektromotorischen Kraft mal der Stromstärke.

Wenn der Effekt bei einer Stromstärke von 1 Ampère 1 Watt ist, so sagen wir: die elektromotorische Kraft ist gleich Eins. Die so definierte Einheit der elektromotorischen Kraft ist das Volt.

Einheit des Widerstandes: Da nach dem Ohm'schen Gesetze der Widerstand gleich der elektromotorischen Kraft dividiert durch die Stromstärke, also $W = \frac{E}{J}$ ist, so folgt, dass $W = 1$ wird, wenn $E = 1$ und $J = 1$.

Der Widerstand eines Leiters ist mithin gleich der Einheit des Widerstandes, wenn eine Stromquelle von 1 Volt elektromotorischer Kraft durch ihn einen Strom von 1 Ampère hindurchsendet. Dieser Einheit des Widerstandes hat man den Namen Ohm beigelegt.

Potential, Spannung, elektromotorische Kraft.

Die Elektricitätsmengen, von denen im Folgenden die Rede sein wird, mögen vorläufig positive sein.

Wenn wir von einer sehr kleinen Kugel sprechen, so thun wir dies, damit wir von der Schwerkraft und der Reibung zwischen Kugel und Luft absehen können. Eine sehr kleine Kugel nennen wir im folgenden Texte mitunter Punkt.

Die Ausdrücke: „eine Kugel sei mit der Elektricitätsmenge E geladen“, „eine Kugel mit der Elektricitätsmenge E“ sind so zu verstehen: Wir haben der Kugel E Einheiten Elektricität (etwa Coulomb) auf irgend eine Weise mitgeteilt, etwa dadurch, dass wir die Kugel mit dem Konduktor einer Elektrisiermaschine in leitende Verbindung setzten.

A (Fig. 135) sei eine mit der Elektricitätsmenge *E* geladene Kugel, *B* eine sehr kleine Kugel mit der Elektricitäts-

menge Eins. *E* übt, wo auch immer *B* sich befinden möge, eine abstossende Kraft auf *B* aus. Die Kraftwirkung der Elektricitätsmenge *E* ist, wie die Mathematik lehrt, dieselbe, wie wenn *E* im Mittelpunkte der Kugel *A* concentriert wäre (Kraftcentrum).

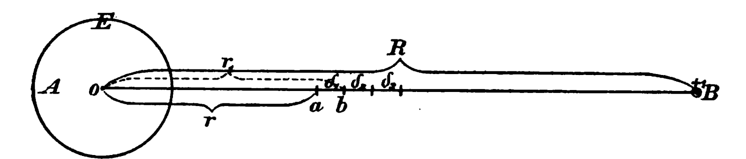


Fig. 135.

Nähern wir *B* der Kugel *A*, so müssen wir die abstossenden Kräfte überwinden; also gegen die elektrischen Kräfte Arbeit leisten. Es fragt sich nun: wie gross ist die zu leistende Arbeit, wenn man die Elektricitätsmenge 1 der Kugel *A* bis zu einem gewissen Abstande *r* (*r* ist der Abstand der beiden Kugelmittelpunkte) nähert? Die Aufgabe wird dadurch verwickelt, dass wir es hier nicht mit einer konstanten Kraft, sondern mit einer stetig wachsenden Kraft zu thun haben. Denn die Abstossung, die zwei Elektricitätsmengen *E* und *E'* auf einander ausüben, ist nach dem Coulomb'schen Gesetze gleich $\frac{E \cdot E'}{r^2}$ *) (Dynen). Will man die gestellte Aufgabe in elementarer Weise lösen, so zerlegt man den Weg $R-r$ in sehr kleine Teilchen δ_1, δ_2 . . . und bestimmt zunächst die Arbeit, die bei einer Verschiebung von *B* längs des Weges δ_1 zu leisten ist. Zu dem Zwecke bestimmt man die Kräfte, mit denen *B* im Anfangs- und Endpunkte von δ_1 abgestossen wird, und nimmt aus den beiden Kräften das arithmetische Mittel.

---

*) Ersetzen wir in der Definition für den Einheitspol (S. 181) das Wort Magnetismus durch Elektricität, so erhalten wir eine Definition für die elektrostatische Einheit der Elektricitätsmenge. Messen wir E und E' in diesen Einheiten, so erhalten wir die Kraft in Dynen. Ein Coulomb ist ungefähr gleich 3000 Millionen elektrostatischer Einheiten.

In unserem Ausdrucke sind E, E' und r unbenannte Zahlen. Ist z. B. r = 10 cm, so hat man für r die Zahl 10 zu setzen.

Man nimmt ferner an, dass während des Transportes auf dem sehr kleinen Wegstückchen δ_1 die Kraft konstant sei, nämlich gleich der mittleren Kraft. Multipliziert man diese Kraft mit dem Wege δ_1, so erhält man die Arbeit.

In derselben Weise berechnet man die Arbeit, die während des Transportes längs des sehr kleinen Weges δ_2 zu leisten ist etc. Die Summe dieser Einzelarbeiten ist dann gleich der zu berechnenden Arbeit.

b a sei ein solches Wegstückchen und $Oa = r$, $Ob = r_1$.

$$\left.\begin{array}{l}\text{Kraft in b}: \frac{E.1}{r_1^2} \\ \text{„ „ a}: \frac{E.1}{r^2}\end{array}\right\} \text{Mittlere Kraft } f = \frac{1}{2}\left(\frac{E}{r_1^2} + \frac{E}{r^2}\right) =$$

$$\frac{E}{2}\,\frac{r_1^2 + r^2}{r_1^2 . r^2}.$$

Wir setzen für r_1 im Zähler $r + \delta_1$:

$$f = \frac{E}{2}\,\frac{(r^2 + 2r\delta_1 + \delta_1^2) + r^2}{r_1^2 . r^2} = \frac{E}{2}\,\frac{2r^2 + 2r\delta_1 + \delta_1^2}{r_1^2 . r^2}.$$

δ^2 ist im Vergleich zu $2r^2 + 2r\delta_1$ verschwindend klein (ist z. B. $r = 3$ cm $= 30$ mm und $\delta = 0{,}1$ mm, so ist $2r^2 + 2r\delta_1 = 1800 + 6$ und $\delta_1^2 = 0{,}01$, also 180600mal so wenig wie $2r^2 + 2r\delta_1$).

δ^2 kann man also weglassen:

$$f = \frac{E}{2}\,\frac{2r^2 + 2r\delta_1}{r_1^2 . r^2} = E\,\frac{r(r + \delta_1)}{r_1^2 . r^2} = \frac{E}{r . r_1}, \text{ da } r + \delta_1 = r_1.$$

Weg: $r_1 - r$. Mithin Arbeit v_1:

$$v_1 = \frac{E}{r . r_1}(r_1 - r) = E\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_1}\right) \text{ Erg (bei E elektrostatischen Einheiten).}$$

Für das Wegstück δ_2 findet man:

$$\text{Arbeit } v_2 = E\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) \text{ etc.}$$

Nennen wir die Gesamtarbeit V, so ist

$$V = v_1 + v_2 + \ldots = E\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R}\right).$$

Nähern wir den Punkt B aus sehr grosser Entfernung — aus der Unendlichkeit — A bis auf den Abstand r, so ist $\frac{1}{R} = \frac{1}{\infty} = o$ und

$$V = \frac{E}{r}.$$

Man nennt $V \left(= \frac{E}{r}\right)$ das Potential zwischen der Elektricitätsmenge E und der im Abstande r befindlichen Elektricitätsmenge + 1 oder kürzer „das Potential von E in dem Punkte, der den Abstand r hat“.

Dieselbe Arbeit $\frac{E}{r}$ wird von dem System (Elektricitätsmenge E und 1) für uns geleistet, wenn B aus der Entfernung r in die Unendlichkeit oder bis zu einem Orte getrieben wird, in dem das Potential Null ist.

Wenn wir sagen: das Potential der Elektricitätsmenge E in dem Punkte P oder auf den Punkt P ist gleich 100, so heisst das: Wenn wir die Elektricitätsmenge 1 aus der Unendlichkeit an den Ort P transportieren — auf welchem Wege, ist, wie die Mathematik lehrt, hierbei gleichgültig —, so müssen wir gegen die abstossenden Kräfte des Systems die Arbeit 100 Erg leisten, oder: wenn die Elektricitätsmenge + 1 durch die Elektricitätsmenge E in die Unendlichkeit oder auf die Erde (auf der das Potential den Wert Null hat) getrieben wird, so wird für uns die Arbeit 100 Erg geleistet.

Die Annäherung der Elektricitätsmenge 1 an die Kugel A hat Ähnlichkeit mit dem Zusammendrücken einer Feder oder der Kompression eines Gases, das sich in einem cylindrischen Gefässe mit dicht schliessendem Kolben befindet, oder mit dem Heben eines Gewichtes.

Niveauflächen. In allen Punkten, die sich auf derselben Kugeloberfläche mit dem Mittelpunkte O befinden, hat das Potential denselben Wert. Eine Verschiebung der Elektricitätsmenge + 1 oder irgend einer anderen elektrischen Masse auf der Oberfläche dieser Kugel erfordert keine Arbeit — Niveaufläche. (Aehnlich wie der Transport eines Körpers in

einer zur Erdoberfläche parallelen Ebene keine Arbeit erfordert, wenn man von der Reibung absieht.) **Ein Elektricitätsteilchen bewegt sich, wenn es frei beweglich ist, von selbst von Orten höheren Potentials zu Orten niederen Potentials**; denn sich selbst überlassen, bewegt es sich von A, und zwar geht es durch die den Körper A umhüllenden Kugeloberflächen hindurch und durchschneidet sie rechtwinkelig.

Ersetzen wir A durch einen irgendwie geformten elektrisierten Körper, so gilt dasselbe wie eben, nur sind die Niveauflächen dann nicht mehr Kugeloberflächen, sondern andere gekrümmte Flächen, die den Körper einhüllen.

Diejenigen Linien, die die Niveauflächen senkrecht durchschneiden, sind die **Kraftlinien**. Ist der elektrisierte Körper eine Kugel, so sind die Kraftlinien Radien, also gerade Linien. Wiederholt man die vorigen Berechnungen für den Fall, dass A negativ elektrisch ist, so gelangt man zu denselben Resultaten wie eben, wenn man berücksichtigt, dass $-(a+b)$ kleiner ist als $-a$ (-10 ist kleiner als -4), so dass die gefundenen Sätze allgemeine Gültigkeit haben.

Für den Magnetismus gilt dasselbe wie für die Elektricität, da die Wirkungen magnetischer Kraftcentren (Pole) ebenfalls nach dem Coulomb'schen Gesetz erfolgen.

Es kommt nun nicht nur jedem Punkte ausserhalb eines elektrischen Körpers, sondern auch jedem Punkte auf der Oberfläche ein bestimmtes Potential zu. Nehmen wir wieder an, der elektrische Körper sei eine Kugel mit dem Radius r, dann hat das Potential in jedem Punkte der Oberfläche den Wert $\frac{E}{r}$, da die Wirkung der elektrischen Kräfte gerade so erfolgt, wie wenn die Elektricitätsmenge E im Mittelpunkte der Kugel concentriert wäre. Ist nun $r = 1$ cm und $E = 1$, so hat das Potential an jedem Punkte der Oberfläche den Wert 1.

Für alle Punkte der Oberfläche eines jeden Leiters muss das Potential denselben Wert haben. Denn nehmen wir an,

zwei Punkte a und b hätten verschiedene Potentiale, a etwa ein grösseres als b, dann müsste, da ja die Elektricität sich von selbst von Stellen höheren Potentials zu Stellen niedrigeren Potentials bewegt, Elektricität von a nach b fliessen und zwar so lange, bis ein Ausgleich erfolgt ist.

Verbinden wir also zwei Körper, die verschiedene Potentiale haben, leitend mit einander, so muss Elektricität von dem Körper mit dem höheren Potential zu dem anderen Körper fliessen. Denn durch die leitende Verbindung wird aus den beiden Körpern ein Körper.

Ein elektrisierter Körper hat die Fähigkeit, Arbeit zu leisten oder kann Arbeit leisten — er hat potentielle Energie. Die auf einem Körper befindliche Elektricität leistet Arbeit, wenn sie zur Erde mit dem Potential Null abfliesst. Offenbar ist diese Arbeit gerade so gross wie die Arbeit, die wir beim Elektrisieren des Körpers aufwenden mussten. Nehmen wir nun an, wir führen einer Kugel vom Radius r E Einheiten Elektricität zu, und zwar eine Einheit nach der anderen von einem Orte aus, dessen Potential Null ist, also von der Erde aus. Der Transport der ersten Einheit erfordert keine Arbeit, weil die Kugel einstweilen unelektrisch ist, je mehr Elektricität sich auf der Kugel befindet, um so grösser ist die zu leistende Arbeit. (Ähnlich wie wenn man ein Gefäss durch ein am Boden befindliches Druckrohr bis zu einer gewissen Höhe mit Wasser füllen will.) Da sich auf der Kugel zuerst die Elektricitätsmenge Null und zuletzt E befindet, so ist das mittlere Quantum auf der Kugel $\frac{E}{2}$, das Potential also $E . \frac{E}{2} : r = \frac{1}{2} \frac{E^2}{r}$ (wir nähern ja E-mal eine Einheit dem mittleren Quantum $\frac{E}{2}$ bis zur Entfernung r).

Durch Rechnung gelangt man zu diesem Resultate in folgender Weise: Die Elektricitätsmenge E denken wir uns in sehr viele (n) Teile zerlegt und einen Teil nach dem anderen auf die Kugel geschafft. Der Transport des ersten Teiles erfordert keine Arbeit,

der Transport des zweiten Teiles die Arbeit $\frac{E}{n} \cdot \frac{E}{n} \cdot \frac{1}{r}$. Denn transportieren wir die Elektricitätsmenge e' aus der Unendlichkeit nach der Kugel mit der Elektricitätsmenge e hin, so müssen wir die Arbeit $e' \cdot \frac{e}{r}$ leisten; in unserem Falle ist aber $e' = \frac{E}{n}$ und $e = \frac{E}{n}$.

Der Transport des letzten Teiles $\frac{E}{n}$ erfordert die Arbeit $(n-1) \frac{E}{n} \cdot \frac{E}{n} \cdot \frac{1}{r}$, da die Elektricitätsmenge $(n-1) \frac{E}{n}$ schon auf der Kugel ist. Also ist die Gesamtarbeit:

$$\frac{E}{n} \cdot \frac{E}{n} \cdot \frac{1}{r} + \frac{2E}{n} \cdot \frac{E}{n} \cdot \frac{1}{r} + \frac{3E}{n} \cdot \frac{E}{n} \cdot \frac{1}{r} + \ldots (n-1) \frac{E}{n} \cdot \frac{E}{n} \cdot \frac{1}{r} =$$

$$\frac{E^2}{n^2 . r} (1 + 2 + 3 \ldots\ldots n-1) = \frac{E^2}{n^2 . r} . n . \frac{n-1}{2}.$$

Ist nun n sehr gross, so dürfen wir $n-1$ durch n ersetzen und erhalten

$$\frac{E^2}{n^2 . r} . n . \frac{n}{2} = \frac{1}{2} \frac{E^2}{r}.$$

Fliesst die Elektricitätsmenge E zur Erde ab, so leistet sie die Arbeit $\frac{1}{2} \frac{E^2}{r}$. Man nennt $\frac{1}{2} \frac{E^2}{r}$ das Potential von E auf sich selbst.

Kapacität. Diejenige Elektricitätsmenge, die man einem Körper zuführen muss, um sein Potential um eine Einheit zu erhöhen, nennt man Kapacität des Körpers. Setzen wir diese Elektricitätsmenge gleich c, so steigt das Potential, wenn wir dem Körper die Elektricitätsmenge E mitteilen, so oft um eine Einheit des Potentials, wie c in E enthalten ist, das heisst

$$\text{Potential} = \frac{\text{Elektricitätsmenge}}{\text{Kapacität}} \text{ oder}$$

$$\text{Elektricitätsmenge} = \text{Kapacität} \times \text{Potential}.$$

Ist der Körper eine Kugel vom Radius r, so ist das Potential $\frac{E}{r}$, also ist dann

$$E = \text{Kapacität} \times \frac{E}{r} \text{ oder}$$

$$\text{Kapacität} = r.$$

Die Kapacität einer Kugel wird also durch dieselbe Zahl ausgedrückt wie der Radius.

S p a n n u n g. Von vielen Autoren wird der Begriff Spannung mit dem Begriffe Potential identificiert, während andere den Unterschied der beiden Begriffe ausdrücklich hervorheben. Da das Potential nach der Definition eine Arbeit ist, während Spannung an und für sich eine Kraft bedeuten dürfte, so sind Spannung und Potential verschiedene Begriffe. Wir werden aber gleich sehen, dass man selbst dann, wenn man unter Spannung eine Kraft versteht, in einzelnen Fällen die beiden Begriffe für einander setzen kann. Will man aber allgemein Spannung und Potential für einander setzen, so darf man dies nur dann thun, wenn man Spannung mit Spannkraft*) oder potentieller Energie identificiert. (Wenn man eine Feder spannt, so leistet man Arbeit, und die gespannte Feder hat potentielle Energie.)

„Unter Spannung F der Elektricität wollen wir die Kraft verstehen, mit welcher eine Einheit der Elektricitätsmenge von der Oberfläche weg abgestossen wird“ (Müller-Pouillet 9. Aufl. III. S. 217).

Befindet sich auf einer Kugel vom Radius r die Elektricitätsmenge E, so kann man sich diese im Mittelpunkte vereinigt denken. Es ist also nach dem Coulomb'schen Gesetz

$$F = \frac{E.1}{r^2} = \frac{E}{r^2} = \frac{V}{r}, \text{ da } V = \frac{E}{r}.$$

Führen wir zwei gleich grossen Kugeln die Elektricitätsmengen E_1 bezw. E_2 zu, so ist

$$V_1 = \frac{E_1}{r}, \ V_2 = \frac{E_2}{r}, \text{ daher } V_1 : V_2 = E_1 : E_2$$

$$\text{und } F_1 = \frac{E_1}{r^2}, \ F_2 = \frac{E_2}{r^2}, \text{ daher } F_1 : F_2 = E_1 : E_2.$$

Es folgt

$$V_1 : V_2 = F_1 : F_2.$$

---

*) Das Wort „Kraft“ ist hier schlecht am Platze.

In diesem Falle sind also die Spannungen proportional den Potentialen, so dass hier eine Verwechselung der Begriffe Potential und Spannung gestattet ist.

Es kann die Spannung auf zwei Leitern verschieden sein, ohne dass ein Ueberfliessen von Elektricität, wenn man eine leitende Verbindung herstellt, stattfindet. Z. B.

Radius gleich r, Elektricitätsmenge = E;

$$V = \frac{E}{r}, \text{ Spannung} = \frac{E}{r^2};$$

Radius gleich 2r, Elektricitätsmenge = 2E;

$$V = \frac{2E}{2r} = \frac{E}{r}, \text{ Spannung} = \frac{2E}{4r^2} = \frac{E}{2r^2}.$$

Die Spannungen sind also verschieden, die Potentiale aber gleich; mithin erfolgt keine Bewegung der Elektricität.

Wenn die Elektricität auf zwei Körpern verschiedenes Potential hat, so sprechen wir von einer Potentialdifferenz. Diese wird nach der Definition des Potentials durch die Arbeit gemessen, die wir leisten müssten, wenn wir die Elektricitätsmenge + 1 von dem Leiter mit dem höheren Potential auf den Leiter mit dem niederen Potential schaffen wollten.

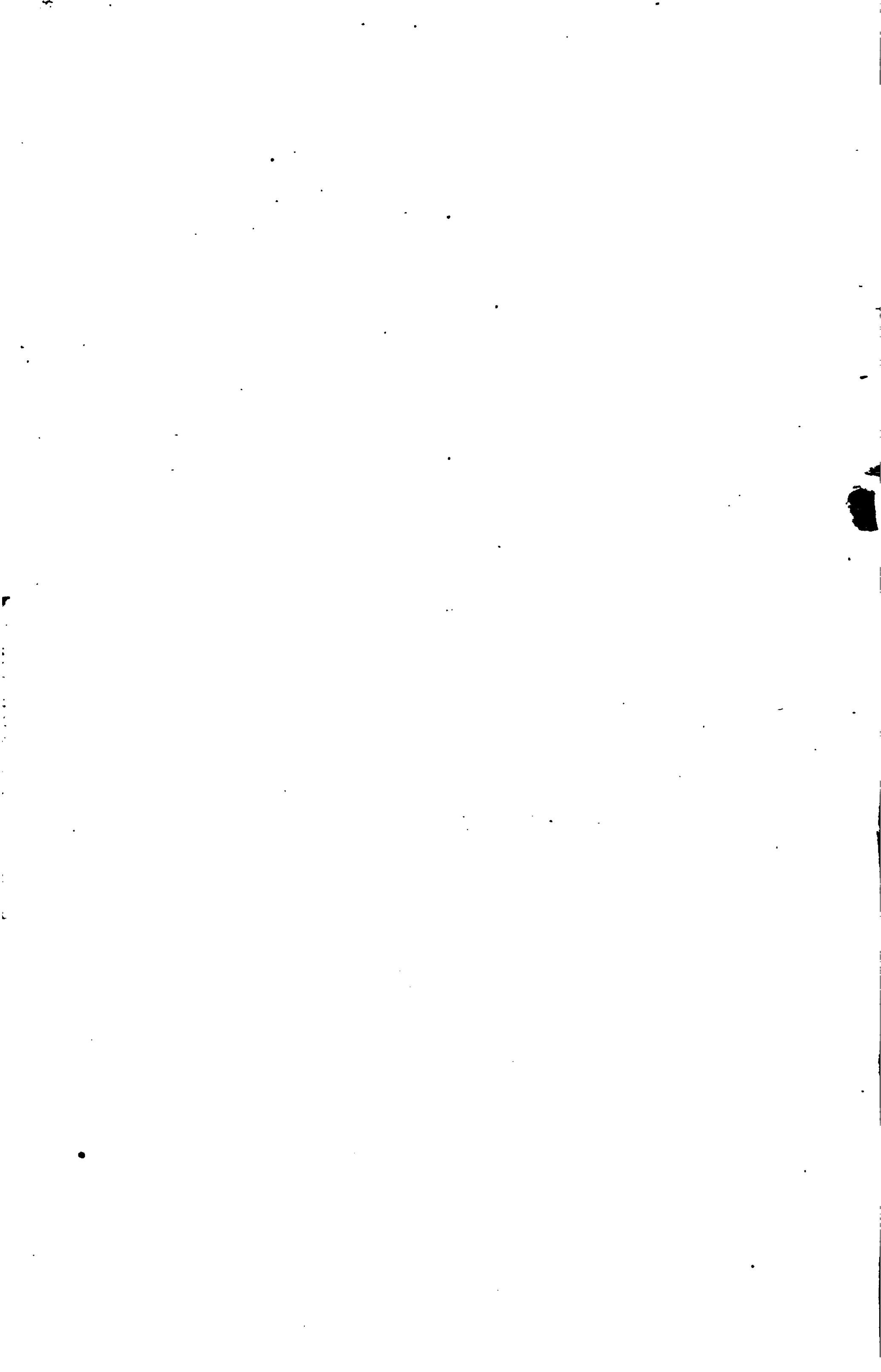
Bei den Stromquellen wird die Potentialdifferenz durch die elektromotorische Kraft hervorgerufen. Die elektromotorische Kraft ist also die Ursache, die Potentialdifferenz die Wirkung. Da wir aber eine Kraft messen, indem wir die Wirkung der Kraft messen, so dient als Mass der elektromotorischen Kraft die Potentialdifferenz an den Klemmen des nicht geschlossenen Elementes. Identische Begriffe sind aber deshalb Potentialdifferenz und elektromotorische Kraft nicht; wir messen beide nur durch dieselbe Zahl. Es wird nun klar sein, dass, obschon das Volt eigentlich ein Mass für eine Kraft (die elektromotorische Kraft) ist, man dasselbe auch als Masseinheit der Potentialdifferenz brauchen darf.

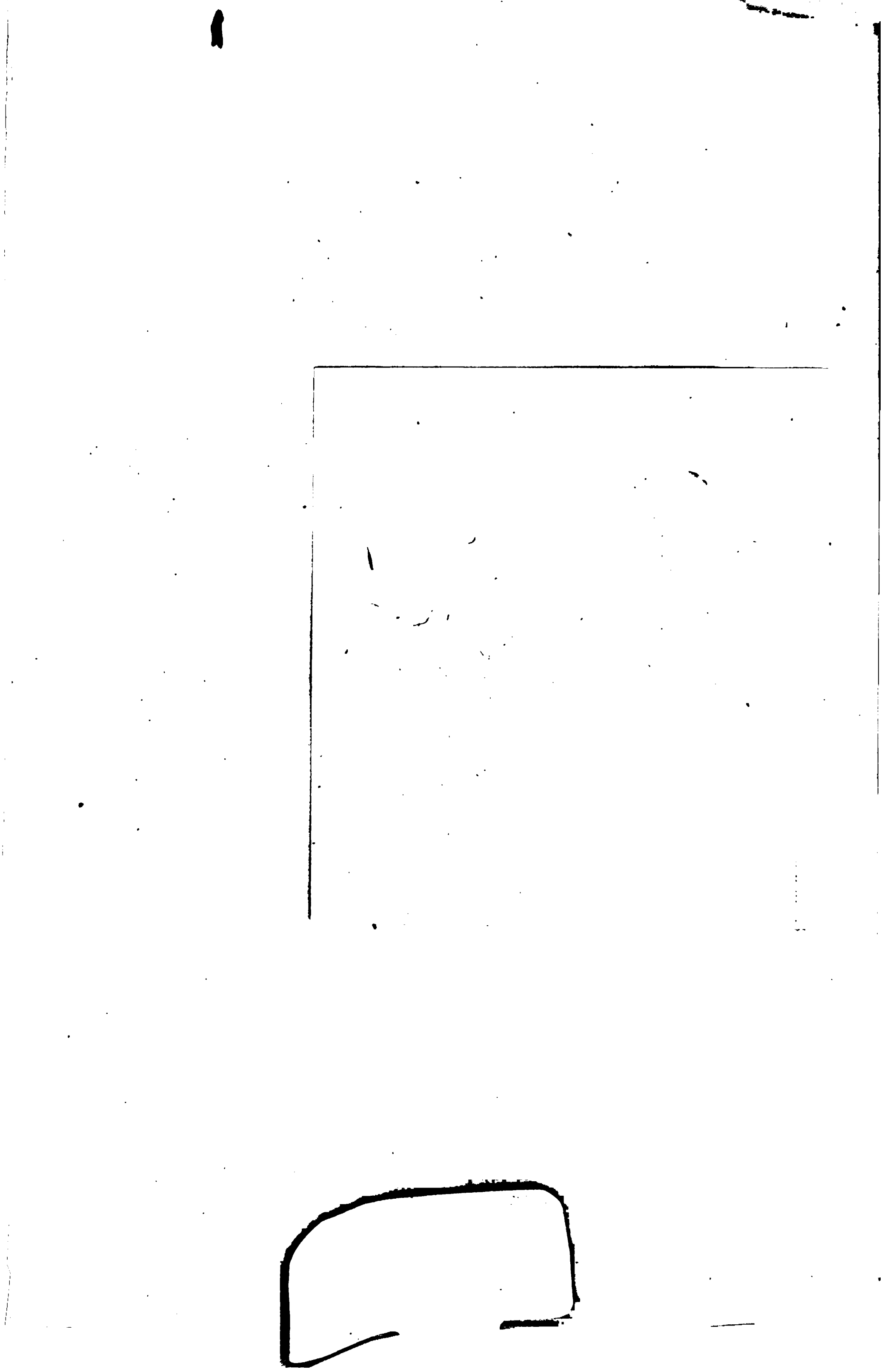
Bei einem geschlossenen Elemente haben wir auch in dem Elemente selbst Potentialgefälle. Es ist dann die Potentialdifferenz an den Klemmen, die sogenannte Klemmenspannung, nicht mehr ein Mass (oder kürzer gleich) der

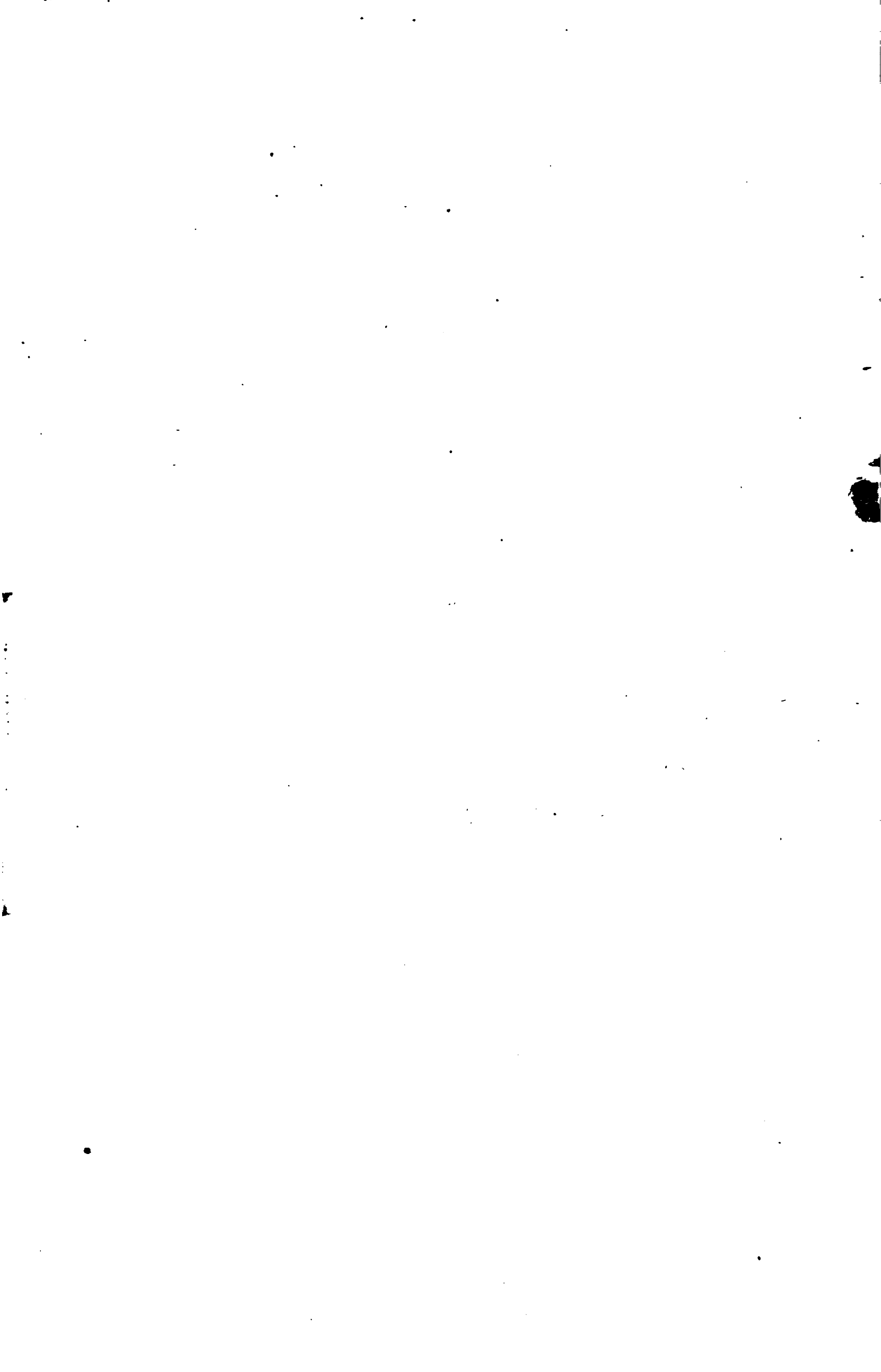
elektromotorischen Kraft. Nur dann, wenn der äussere Widerstand im Vergleich zum inneren sehr gross ist, darf man die Klemmenspannung gleich der elektromotorischen Kraft setzen. Beträgt z. B. die elektromotorische Kraft einer Stromquelle 100 Volt, der innere Widerstand 1 Ohm und der äussere 99 Ohm, so ist das Potentialgefälle im Element 1 Volt, so dass die Klemmspannung 99 Volt beträgt; wäre aber der äussere Widerstand 9 Ohm, der gesamte Widerstand also 10 Ohm, so wäre die Klemmspannung gleich 90 Volt. Bei der Berechnung des nutzbaren Effektes oder des Effektes in der Nutzleitung einer Stromquelle kommt natürlich nur die Klemmspannung in Betracht.

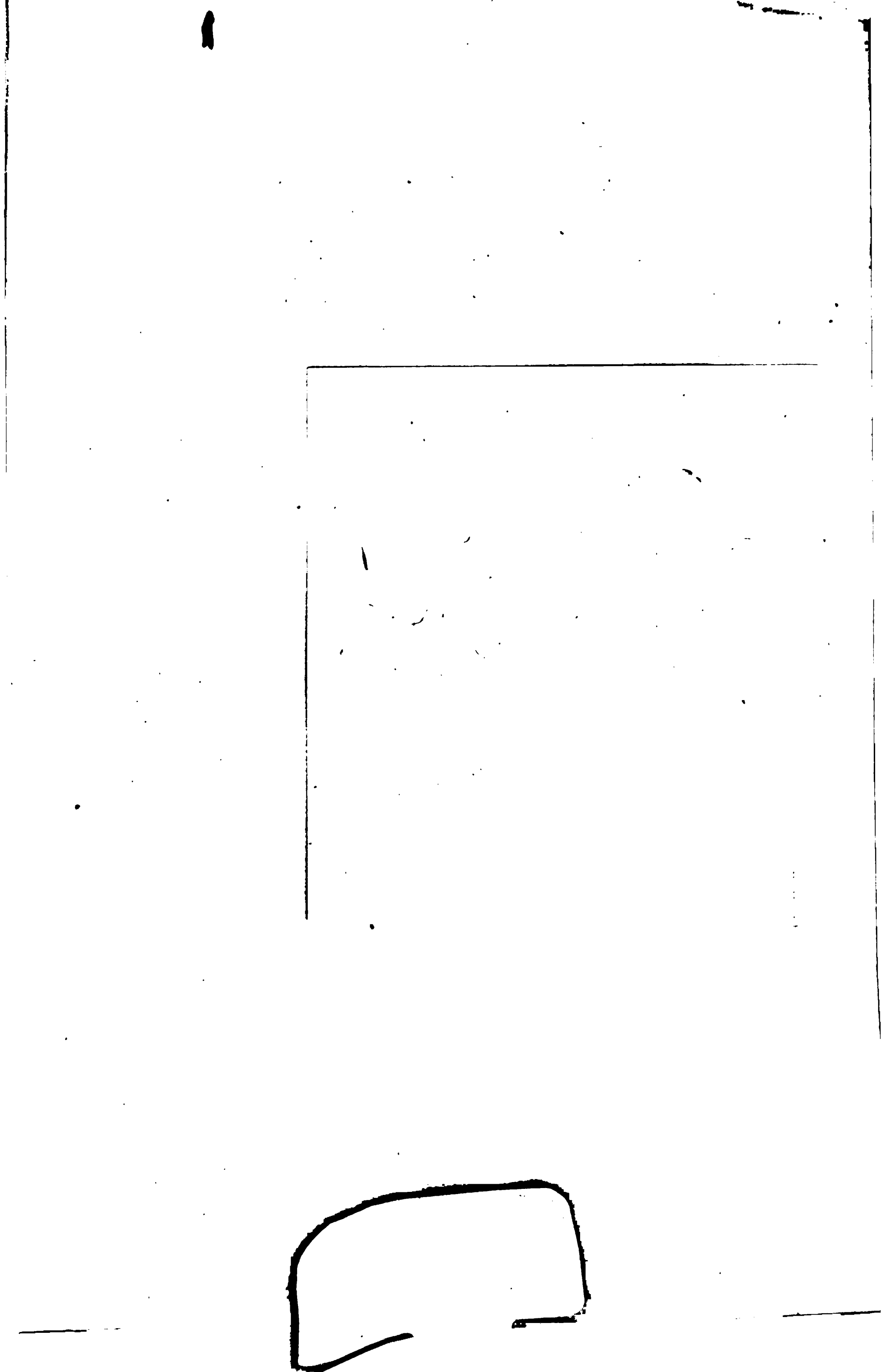
Namen- und Sachregister.

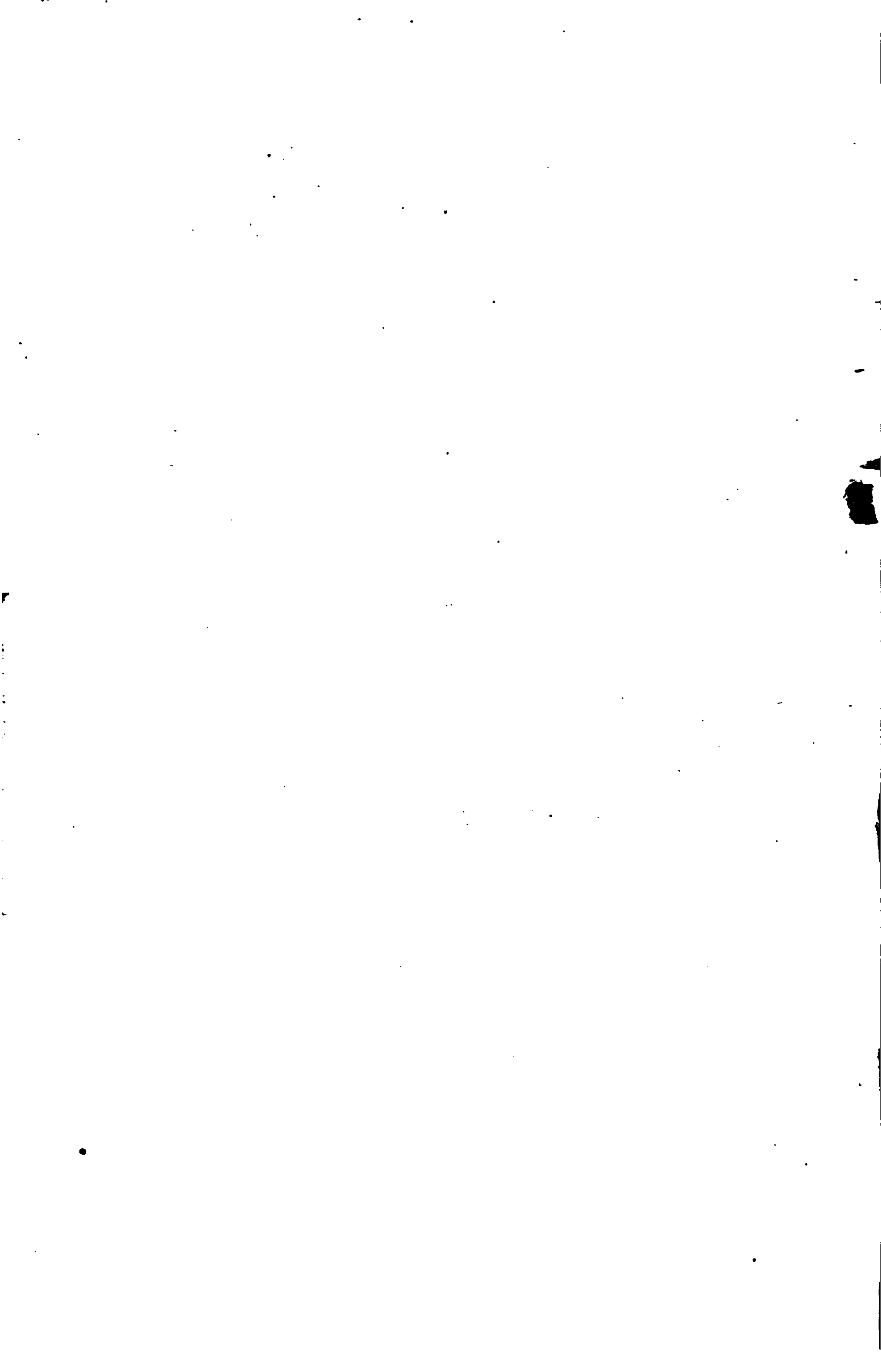
Leipzig, Walter Wigand's Buchdruckerei.

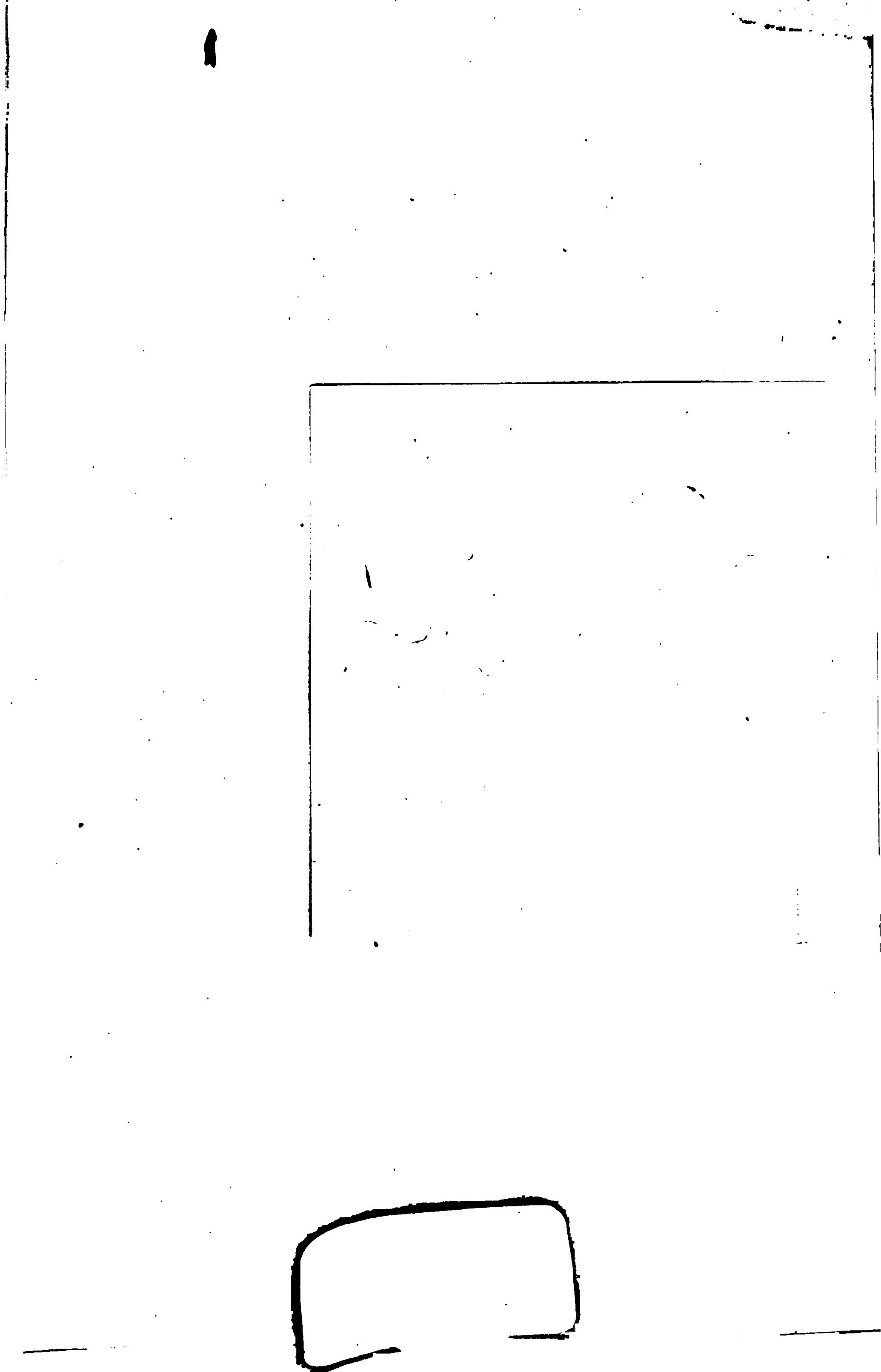


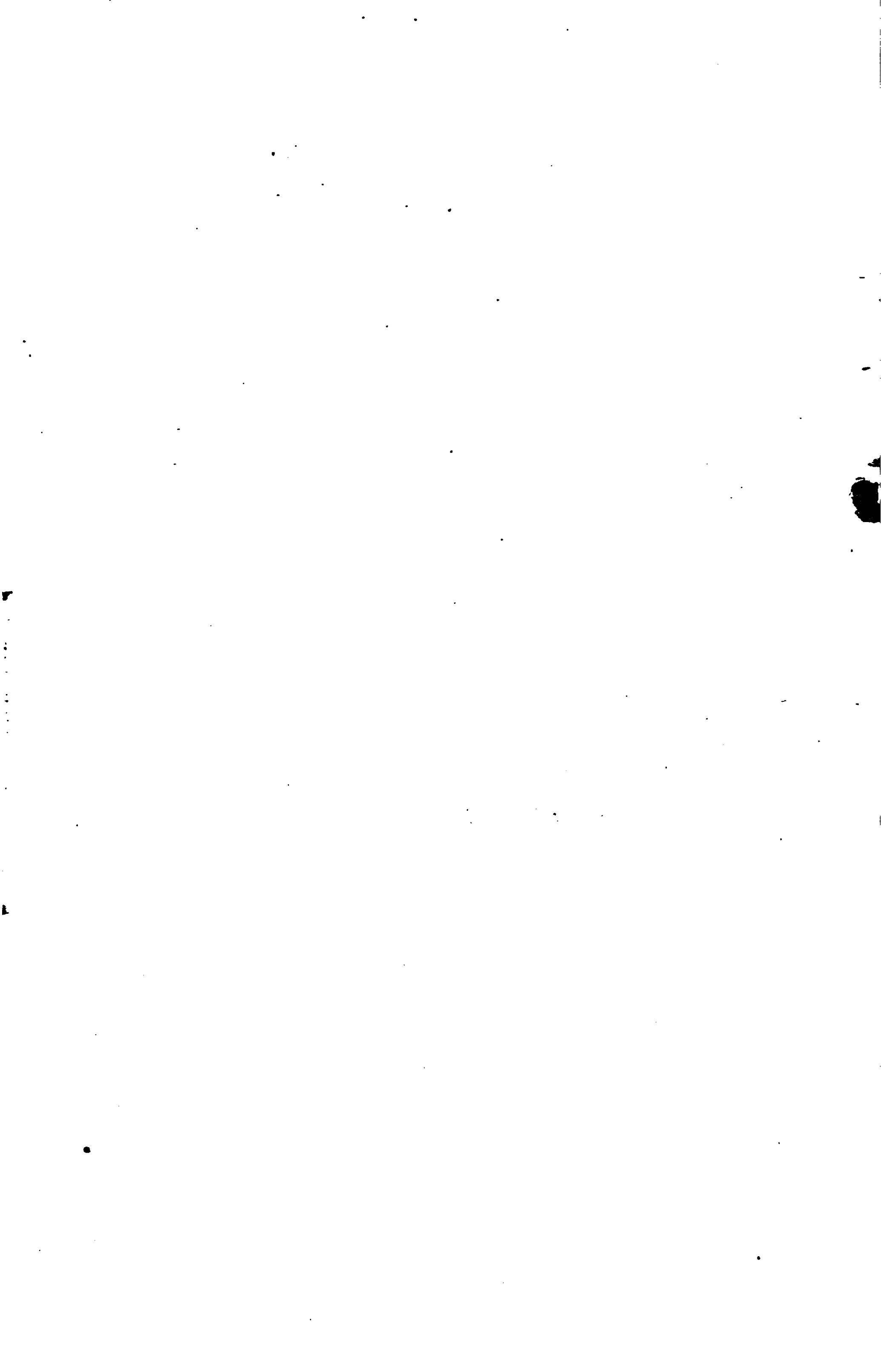


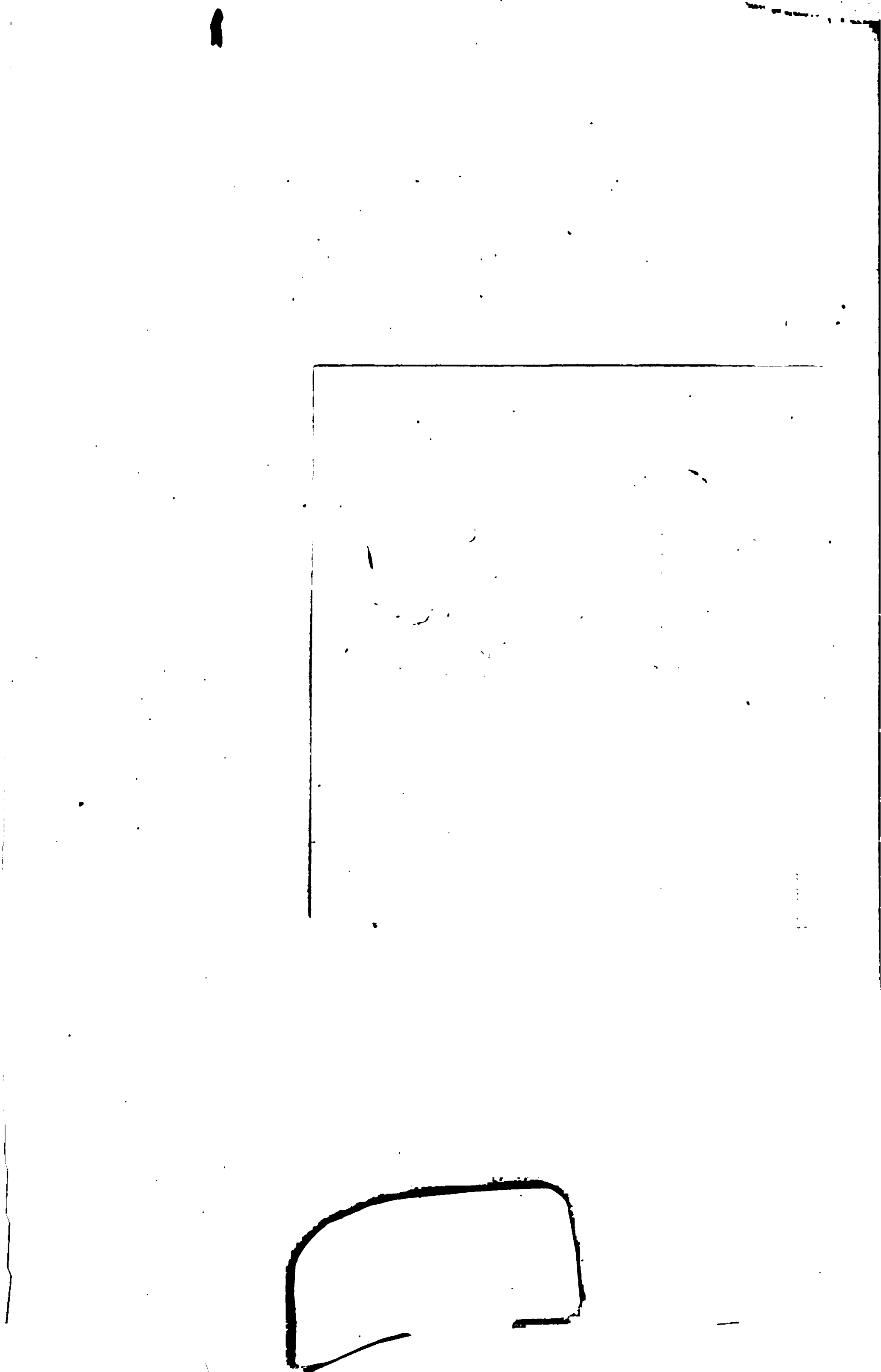


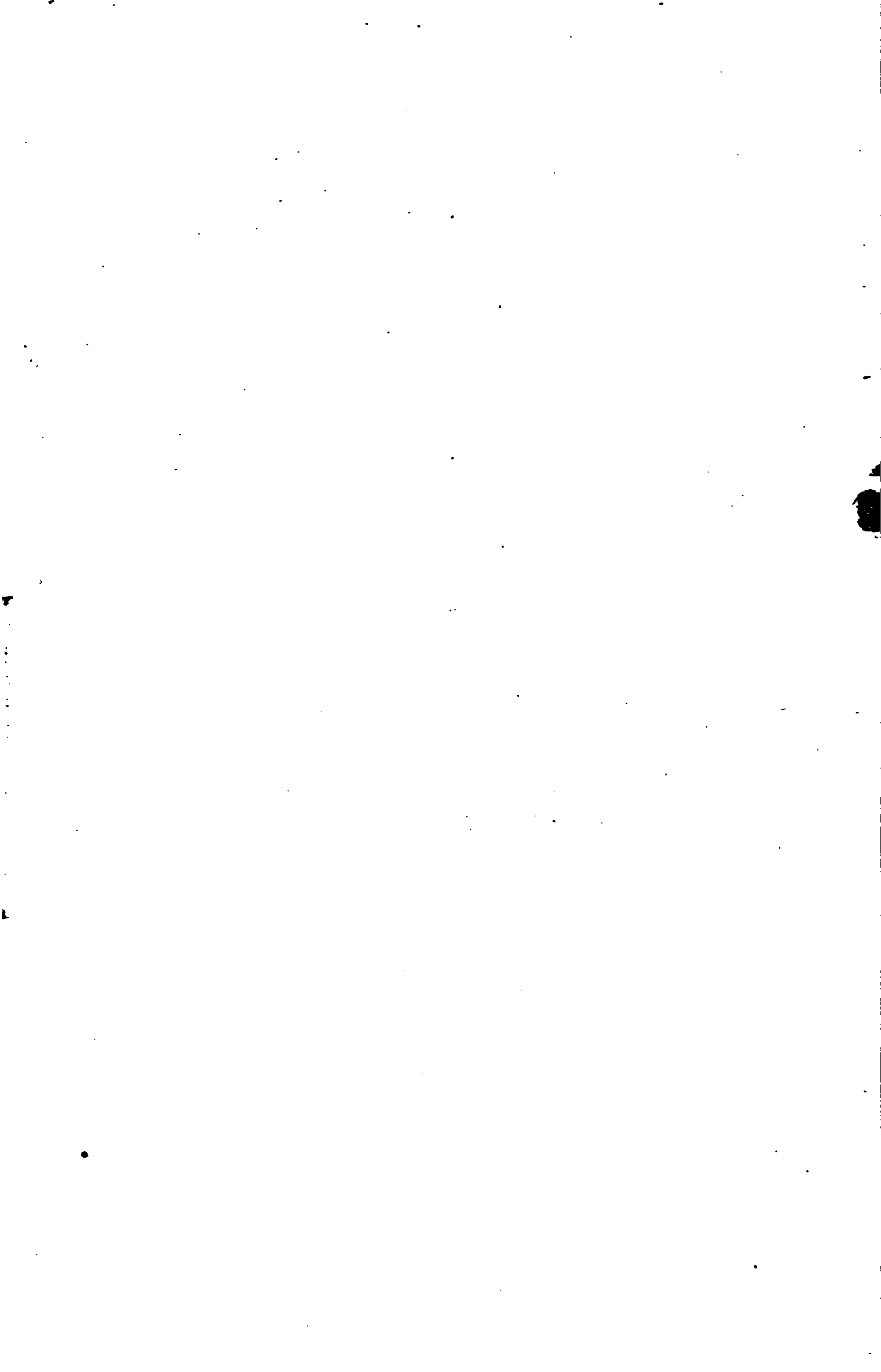


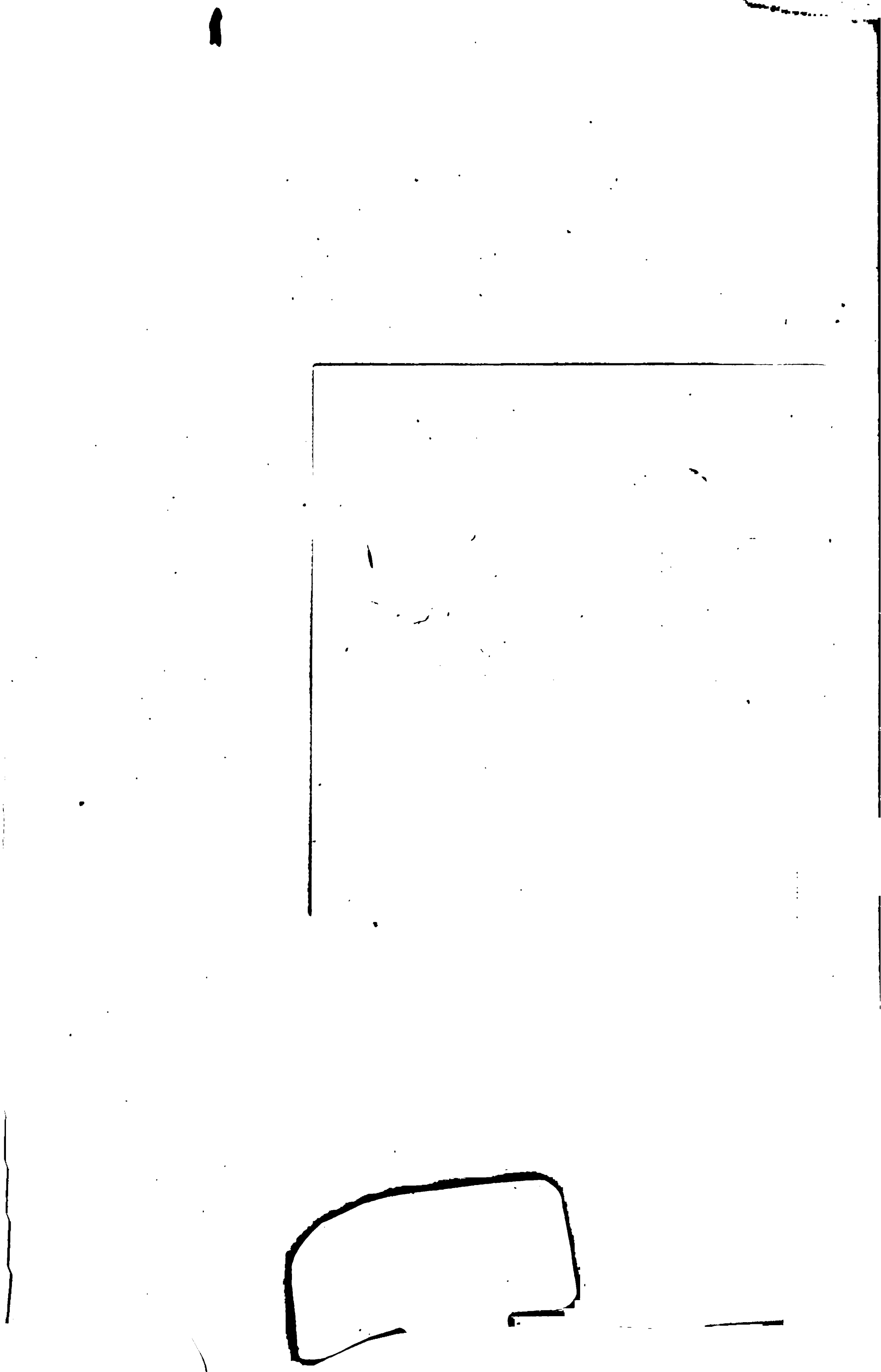













Eng 4008.99
Der elektrische Strom und seine wic
Cabot Science 004041138
3 2044 091 907 592